

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abderrahmane-Mira de Bejaia
Faculté de technologie
Département de génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme Master

Filière : énergies renouvelables

Option : énergies renouvelables en électrotechnique



Thème

**Etude et optimisation d'un système
photovoltaïque**

Réalisé par :

- Zidane M'hamed
-Cheurfa Abdelbaqi

Promoteur : DOCTEUR

- Mme HAMOUCHE Née SERIR Chafiaa

2019 / 2020

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et témoigner notre profonde gratitude à Madame Hamouche née Serir chafiaa, docteur à l'université de Bejaia, qui nous a honoré de son encadrement et qui a accepté la lourde tâche de promoteur. Je lui exprime également notre profonde reconnaissance pour son dévouement d'avoir bien voulu nous faire profiter pleinement de ses compétences scientifiques et encore de ses idées par les quelles elle nous a orienté pour l'accomplissement de ce travail.

Notre remerciement au département d'électrotechnique et à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant les années du cursus. Notre remerciement est également adressé aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. Enfin nous remercions aussi toutes nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Dédicaces

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "Ya Kayoum " Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, A :

- *Ma chère **mère** et mon cher **père** Que dieu les garde et les protège.*
- *A Ma très chère **grande mère** que dieu le garde et le protège " assitewel rebi gel3emris inchalah "*
- *A mes adorables sœurs*
- *A mes oncles et tantes et A toute ma famille maternelle **KALI***
- *A la famille **OUCHENE***
- *A la famille **LEKHSAF***
- *A la famille **MANSOUR***
- *A la famille **OUALI***
- *A la famille **HARKOUK***
- *A la famille **MESSOUCI***
- *A mon cher binôme cheurfa abdlebaqi*
- *A la promotion énergie renouvelable 2019/2020*
- *A Mes amis(es) qui m'ont aidé de loin Ou De Près*
- *A la fin, A toute la famille **ZIDANE** Je tiens à remercier tous (tes)*

Zidane M'hamed

Dédicaces

Merci mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

Je dédie ce modeste travail:

- *A la mémoire de mon très cher Père, que dieu l'accueille dans son vaste paradis*
- *A ma chère Mère,*
- *A mes frères et sœurs (khaled, reyad, abdelouahid, sofyane, salima et sabrina) et leurs petites familles,*
- *A ma chère Katou qui m'a soutenu tout le long de mes études,*
- *A toute ma famille,*
- *A ma deuxième famille (Anis, adel, ghilas et lamin),*
- *A tous mes amis(es) surtout (youba, kouceilla, youcef, Reda, Islam, massi, sahib et nassim),*
- *A mon très cher binôme Zidane M'hamed*
- *A la promo énergies renouvelables 2019/2020*

Cheurfa Abdelbaqi

Sommaire

Sommaire

Introduction général	1
<i>Chapitre I: Etat de l'art sur le système photovoltaïque</i>	
I.1 Introduction	3
I.2 L'énergie solaire	3
I.3 Rayonnement solaire.....	4
I.4 Gisement solaire en Algérie	8
I.5 La cellule photovoltaïque	9
I.6 Générateur photovoltaïque	16
I.7 Différents types de systèmes photovoltaïques.....	18
I.8 Convertisseurs d'énergie	21
I.9 Avantages et inconvénients d'une installation PV	22
I.10 Conclusion	23
<i>Chapitre II: Modelisation et simulation d'un système photovoltaïque</i>	
II.1 Introduction	24
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	24
II.3 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV	29
II.4 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	32
II.5 Conclusion.....	34
<i>Chapitre III: Optimisation et simulation d'un système photovoltaïque</i>	
III.1 Introduction.....	35
III.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal	35
III.3 Optimisation par la méthode de perturbation et observation (P&O).....	36
III.4. La méthode de conductance incrémentielle (CI)	39
III.5 Comparaison entre les deux méthodes (CI) et (P&O) par un test de robustesses.....	43
III.6 Combinaison entre les deux algorithmes (PO-CI)	45
III.7. Conclusion	46
Conclusion général	47
Bibliographie	49

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure I-1: spectre du rayonnement solaire

Figure I-2: le spectre du rayonnement solaire.

Figure I-3: composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo

Figure I-4: Potentiel solaire en Algérie.

Figure I-5: Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Figure I-6: Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

Figure I-7: Structure d'une cellule photovoltaïque.

Figure I-8: cellule mono cristalline et poly cristalline.

Figure I-9: Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.

Figure I-10: Association de N modules solaires en série.

Figure I-11: Association des modules solaires en parallèle.

Figure I-12: Association mixte des modules solaires.

Figure I-13: Cellule, module et panneau PV.

Figure I-14: Un module photovoltaïque.

Figure I-15: Protection des modules photovoltaïques.

Figure I-16: Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

Figure I-17: Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

Figure I-18: Configuration du système hybride à bus continu.

Figure II.1: schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Figure II.2: schéma électrique équivalent du modèle à une diode

Figure II.3: schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.

Figure II-4: Schéma de simulation du panneau photovoltaïque

Figure II-5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

Figure II-6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

Figure II-7: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

- Figure II-8:** Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.
- Figure II-9:** Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.
- Figure II-10:** Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost)
- Figure III-1:** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque
- Figure III-2:** Caractéristique (P_{pv}, V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque.
- Figure III-3:** Organigramme de la méthode perturbation et observation
- Figure III-4:** Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv}= f(V_{pv})$ avec optimisation
- Figure III-5:** Allure de la tension du PV sous les conditions $(1000W/m^2, T_a=25^\circ C)$
- Figure III-6:** Allure de la puissance du PV sous les conditions $(1000W/m^2, T_a=25^\circ C)$
- Figure III-7:** Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P
- Figure III-8:** Organigramme de l'algorithme (CI)
- Figure III-9:** Allure de la tension du panneau photovoltaïque après l'application du la CI.
- Figure III-10:** Allure de la puissance du panneau photovoltaïque après l'application du la CI.
- Figure III-11:** profil d'ensoleillement variable $(T_c=25^\circ C)$,
- Figure III-12:** Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O) et (CI).
- Figure III-13:** Allure de la puissance du panneau photovoltaïque Entre 1.9 seconde et 2.02 seconde.
- Figure III-14:** Allure de la puissance du panneau photovoltaïque Entre 9.0 s et 9.35 s.
- Figure III-15:** Organigramme de l'algorithme combiné (PO-CI)
- Figure III-16:** Allure de la puissance du panneau PV obtenue par l'application de la (PO-CI)

Liste des tableaux

- Tableau I-1:** Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.
- Tableau II-1:** Paramètres électriques des panneaux SIEMENS
- Tableau III-1:** Les modes de perturbation de la méthode P&O.

Introduction général

Introduction général

Introduction général

Depuis les crises successives du pétrole des dernières décennies et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (Pétrole, gaz, charbon...) d'un côté, et face aux débats sur l'énergie nucléaire et le réchauffement climatique d'un autre côté ; la nécessité de la diversification énergétique, de la sécurisation des approvisionnements et de la protection de l'environnement est devenue une urgence mondiale. Cette situation a conduit à la recherche d'autres ressources d'énergies de remplacement.

Les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution de remplacement par excellence et elle est de plus en plus utilisée dans nos jours. Pour cela Le rôle de ce système est de la production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT «Maximum Power Point Tracking»).

Il existe plusieurs méthodes qui ont été largement mises en œuvre pour suivre la techniques MPPT. Les méthodes les plus courantes sont : « Perturber et observer » (P&O), « l'incrémentation de la conductance » (CI).

Le but de ce travail est l'étude d'un système d'énergie photovoltaïque autonome.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Dans le premier chapitre, nous présenterons une synthèse de l'état de l'art actuel sur l'énergie photovoltaïque. Ainsi que les différentes technologies des cellules solaires, leur

Introduction général

principe de fonctionnement. A la fin de ce chapitre, on mettra en valeur les avantages et les inconvénients de ce système.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation du système photovoltaïque, qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation et l'optimisation de système photovoltaïque par la méthode de perturbation et observation (P & O) et la méthode conductance incrémentiel (CI).

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I

Etat de l'art sur le système photovoltaïque

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables. Du au fait que celles-ci sont épuisables, des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (hydraulique, vent, solaire, houle, biomasse, géothermie, marée).

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine.

Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins, ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications.

I.2.L'énergie solaire

L'énergie solaire représente une alternative aux énergies fossiles habituelles. Disponible en grande quantité à notre échelle et répartie sur toute la surface de la terre, elle permet de récupérer jusqu'à 1000W/m² dans les zones tempérées. Que l'on soit en milieu urbain ou au contraire, en site isolé, cette énergie peut être récupérée et utilisée sous forme thermique ou électrique [A1], il existe différents types d'énergies solaires [A2]:

a. L'énergie passive : Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

b. L'énergie solaire thermique : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur).

c. L'énergie thermodynamique : Cette énergie est l'une des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.

d. L'énergie photovoltaïque : Énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

Dans notre travail, nous nous intéressons particulièrement à l'énergie solaire photovoltaïque.

I.3.Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [A3]:

$$\text{Diamètre de soleil } D_s = 1.39 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$\text{Diamètre de la terre } D_t = 1.27 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$$\text{Distance moyenne soleil- terre } L_{ts} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

I.3.1. Le spectre de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire s'est rayonnement électromagnétique décomposé de grains de lumière appelés photons .L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde dont 98% d'énergie est comprise entre $\lambda=0.25\mu\text{m}$ et $\lambda=4\mu\text{m}$ le reste représente 1% au-dessus et 1% au –dessous de cet intervalle.

Le spectre de rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K. [A4]

La répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde est [A5] :

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

Pour $0.25\mu\text{m} < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$: c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour $0.4\mu\text{m} < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$: c'est le domaine du visible, il représente 47.5% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour $0.8\mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$: c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45.5% de l'énergie totale émise par le soleil.

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée par la loi de WIEN :

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m K} \quad (1)$$

Pour $T=2800\text{K} \Rightarrow \lambda_m \approx 0.5\mu\text{m}$

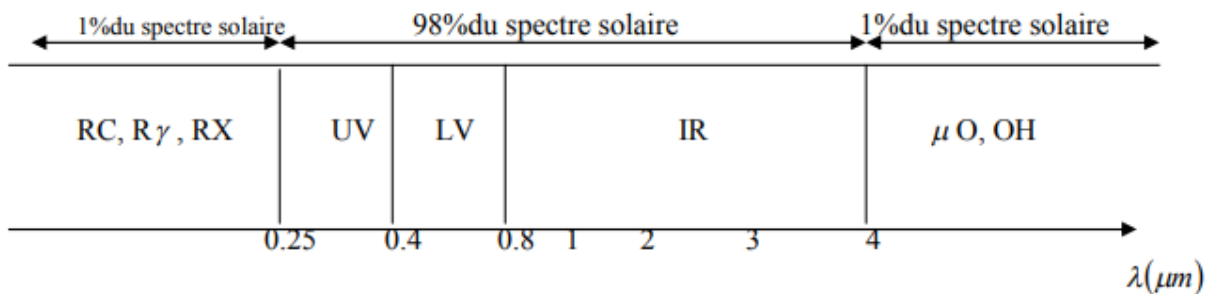


Figure I-1 : spectre du rayonnement solaire

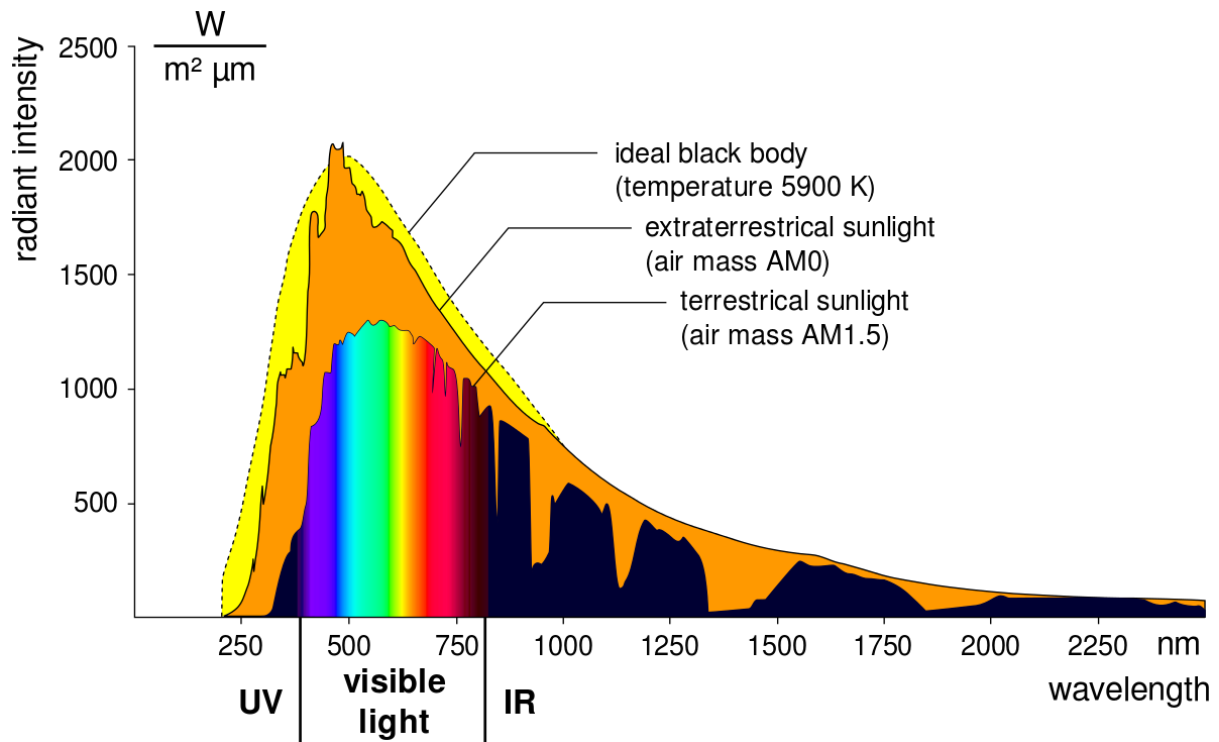


Figure I-2: le spectre du rayonnement solaire. [A6]

I.3.2. Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- **Le rayonnement direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- **Le rayonnement diffus** : est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.
- **L'albédo** : est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. [A7]

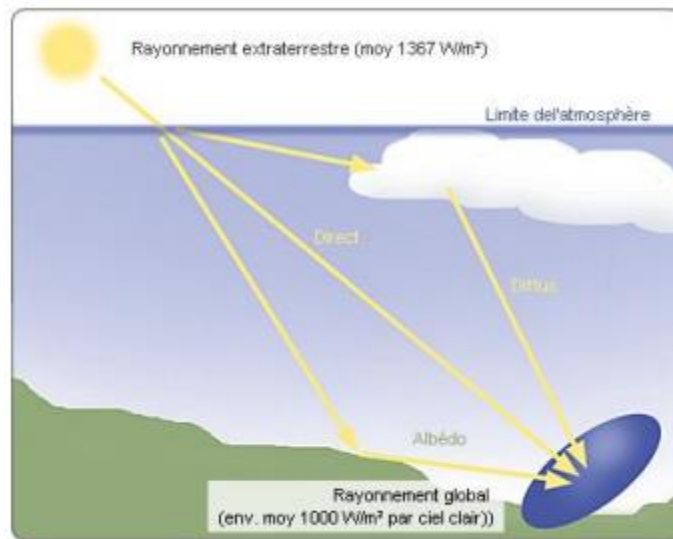


Figure I-3: composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo [A8]

I.3.3. Orientation et inclinaison

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement.

En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante:

$$\text{Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle} = \text{Latitude du lieu} + 10^\circ$$

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus [A9].

I.4. gisement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au nord et $2263\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'enseillement pour chaque région de l'Algérie [A10] [A11].

Régions	Littoral	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

Tableau I-1 : Taux d'enseillement pour quelque région de l'Algérie. [A12]

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

(La Figure I-4) quant à elle donne le potentiel solaire en Algérie [A10].

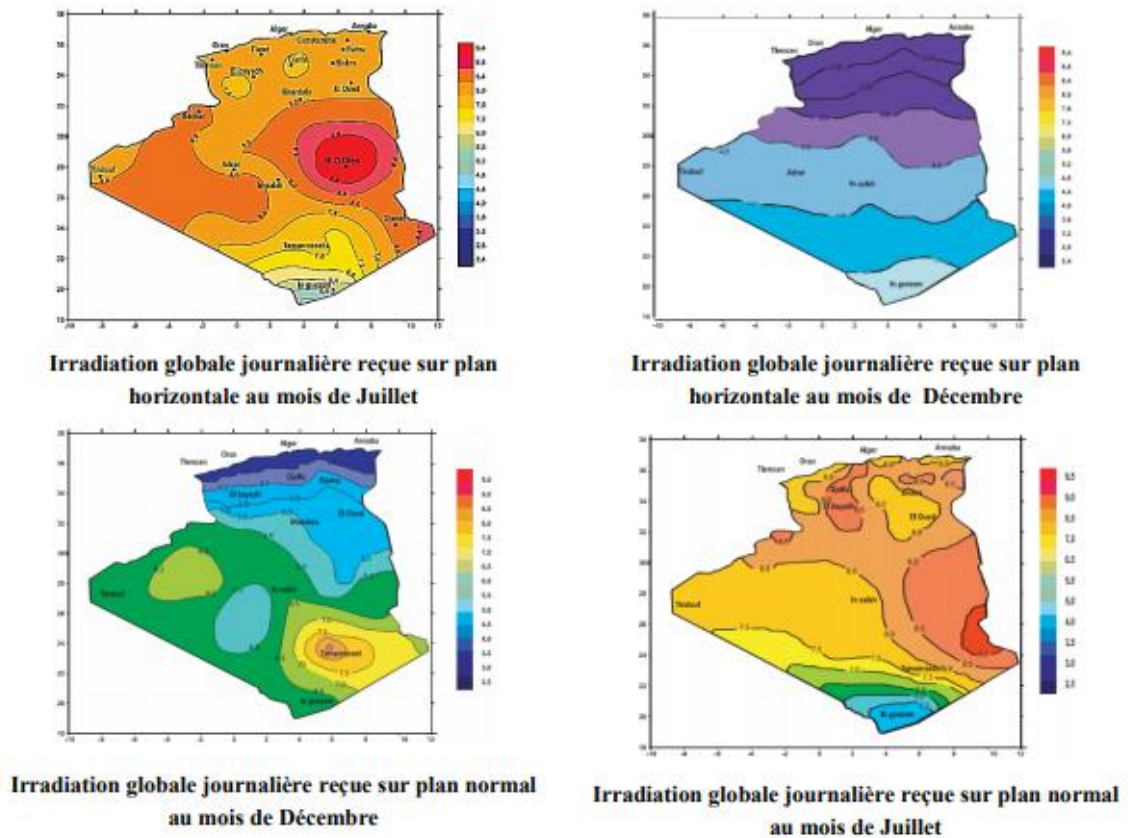


Figure I-4: Potentiel solaire en Algérie. [A12]

I.5. la cellule photovoltaïque

I.5.1. Définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

I.5.2. Principe de fonctionnement

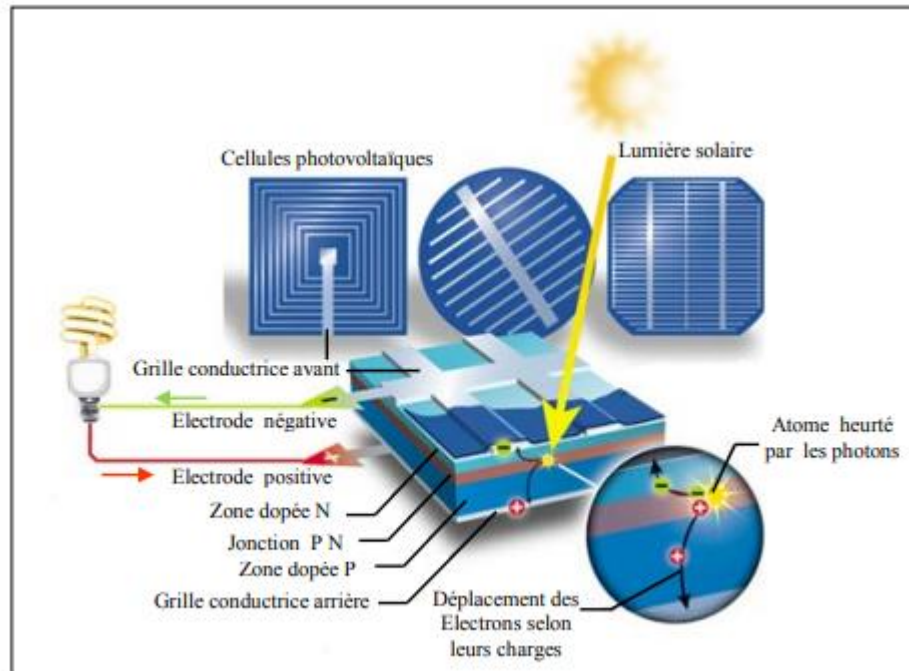


Figure I-5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV. [A15]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [A13]. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **N** et dopée de type **P**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **N** diffusent dans le matériau **P**. La zone initialement dopée **N** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **P** chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **N** et les trous vers la zone **P**. Une jonction **PN** a été formé [A15].

I.5.3. Structure d'une cellule photovoltaïque

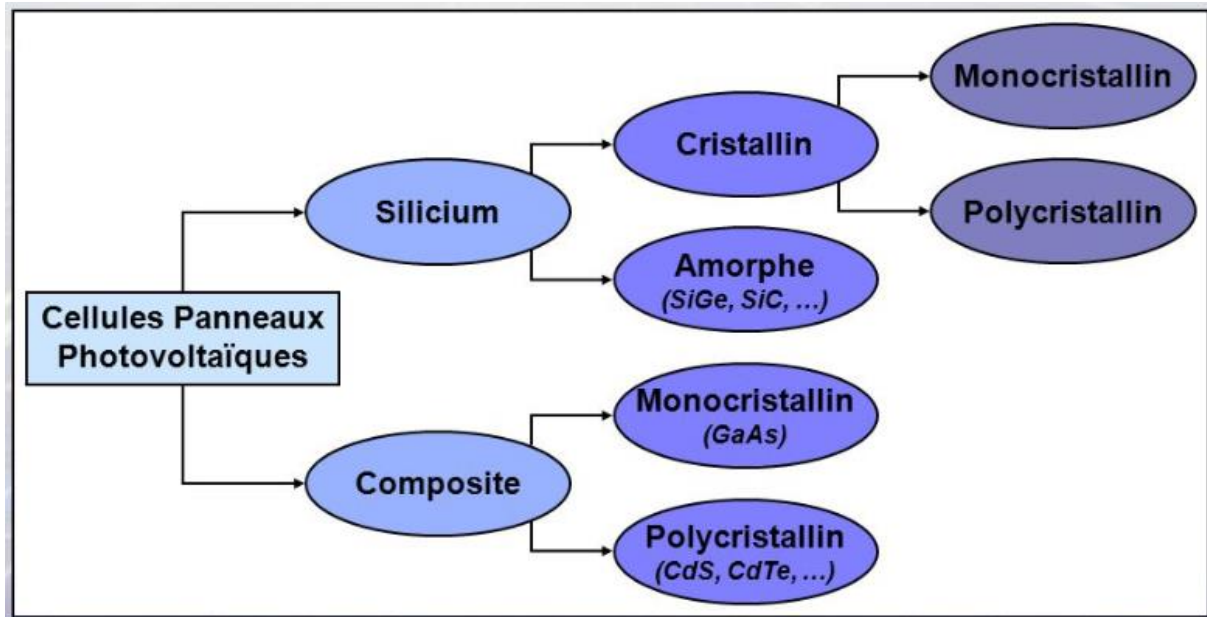


Figure I-6: Les différentes technologies des cellules photovoltaïques. [A16]

La cellule est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. Parmi les cellules photovoltaïques utilisant le silicium comme matériel de base on distingue les monocristallins, les poly cristallins et amorphes. Ainsi la cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée et est celle qui a les meilleures performances, tandis que la cellule en silicium poly cristallin est moins couteuse que celle du silicium monocristallin et son efficacité est plus faible et les processus de sa préparation est moins stricte, enfin la structure de la cellule photovoltaïque amorphe présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. Généralement, la couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative. La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous positifs (P). Il faut ajouter des contacts électriques transparents, une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons, ainsi qu'une couche de verre pour résister aux intempéries. [A17]

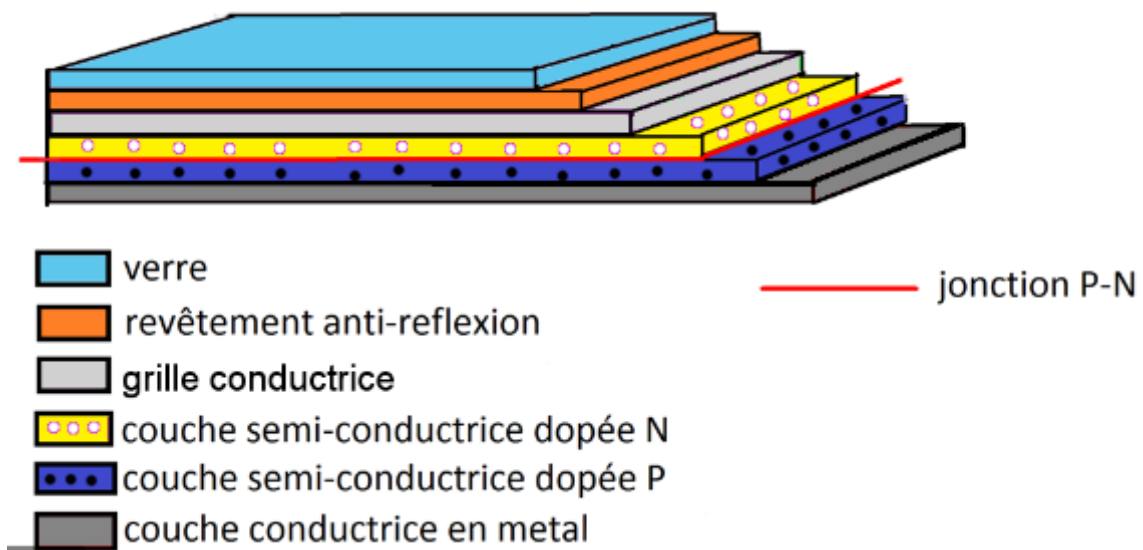


Figure I-7 : Structure d'une cellule photovoltaïque. [A18]

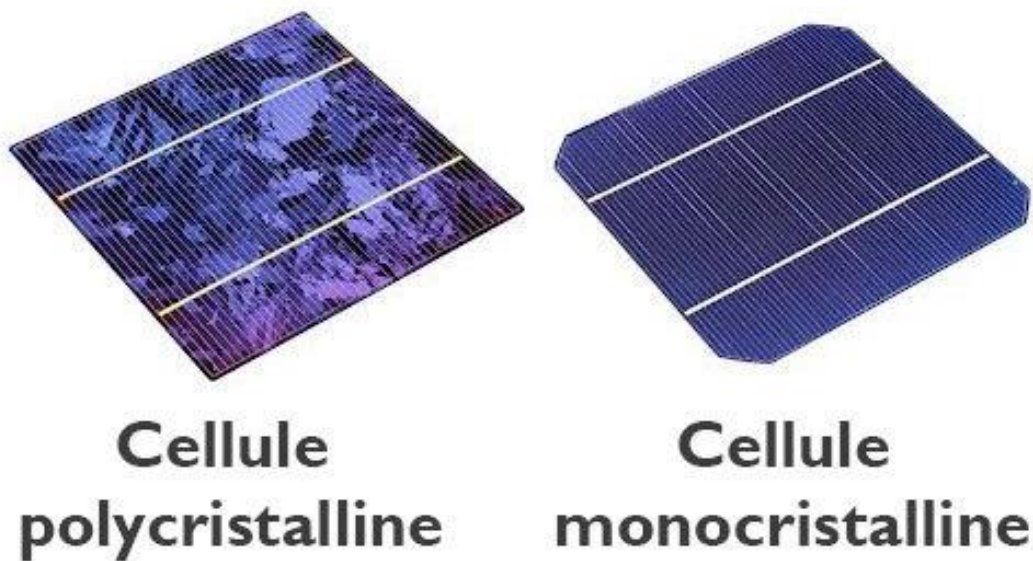


Figure I-8: Cellule mono cristalline et poly cristalline. [A19]

I.5.4. caractéristique de la cellule photovoltaïque

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées en figure (I-9). La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairage, cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{sc} (courant de court-

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale du circuit ouvert). [A20]

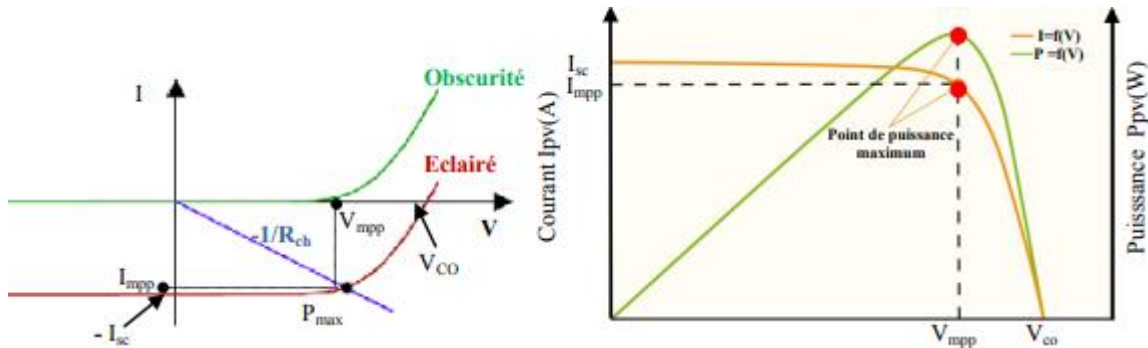


Figure I-9: Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire. [A20]

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par les paramètres suivants :

Tension de circuit ouvert V_{co} (pour $I = 0$)

Elle est en fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. Pour une cellule donnée, elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, au moins pour des éclaircissements supérieurs à 100 W/m^2 (ce qui correspond au rayonnement solaire sur terre d'une journée très couverte). On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule [A21].

Courant de court-circuit I_{sc} (pour $V = 0$)

Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclaircissement G , à la température ambiante, à la vitesse de circulation de l'air ambiant. Il est également directement fonction de la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule [A22].

Point de puissance maximale (P_{max})

C'est le point où la puissance dissipée dans la charge est maximale (V_{mpp} , I_{mpp})

$$P_{max} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (I.2)$$

Le facteur de forme FF

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

Rapport entre la puissance optimale P_{max} et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{co} \cdot I_{sc}} \quad (I.3)$$

Le rendement de conversion d'énergie η

Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

$$\eta = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{S \cdot E_s} \quad (I.4)$$

Avec :

I_{mpp} : Courant optimum (au point de puissance maximale) (A).

V_{mpp} : Tension optimale (au point de puissance maximale) (V).

E_s : Ensoleillement en W/m^2

S : Surface génératrice en m^2

I.5.5. Association des cellules

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc..) peuvent endommager les cellules de façon permanente. [A17]

a. Association en série : La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

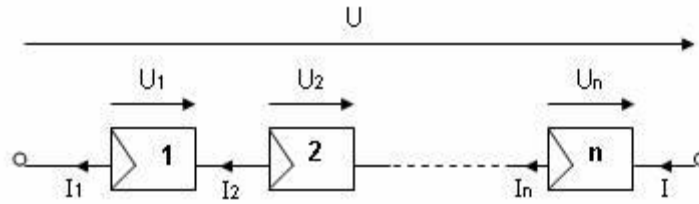


Figure I-10: Association de N modules solaires en série. [A23]

b. Association en parallèle : En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

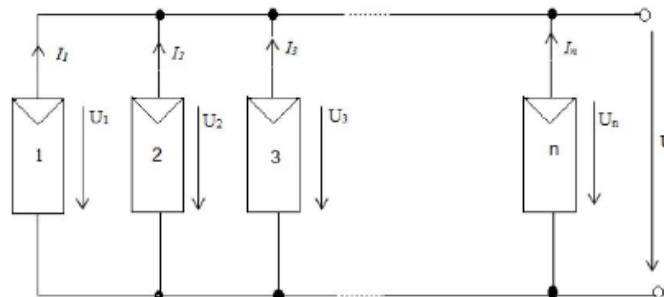


Figure I-11: Association des modules solaires en parallèle. [A23]

c. Association série-parallèle : Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.

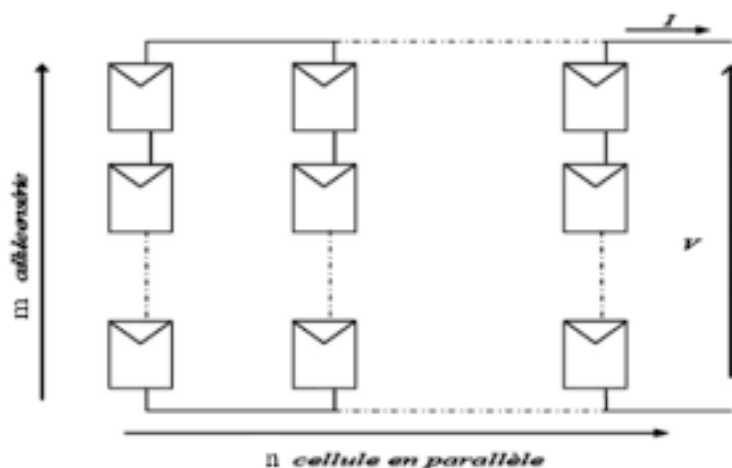


Figure I-12 : Association mixte des modules solaires. [A23]

I.6. Générateur photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et en parallèle [A24], elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire, elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit [A25]. Si une cellule (sous éclairage) n'est pas connectée à un circuit extérieur elle présente une tension nommée tension de circuit ouvert (V_{co}) fortement dépendante de la température. D'autre part, le courant maximal PV est atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit noté ICC dépendant fortement du niveau d'éclairement noté E.

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie). Ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est possible et souvent utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande [A24].

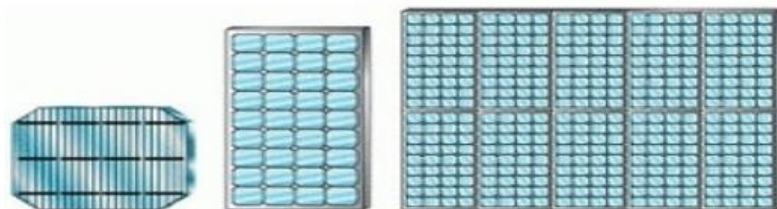


Figure I-13 : Cellule, module et panneau PV. [A26]

I.6.1. caractéristique d'un module photovoltaïque

Voici la description des paramètres d'un module:

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairage de 1000 W/m^2).

La caractéristique I (V): Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ".

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour éclaircissement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$ [A28].

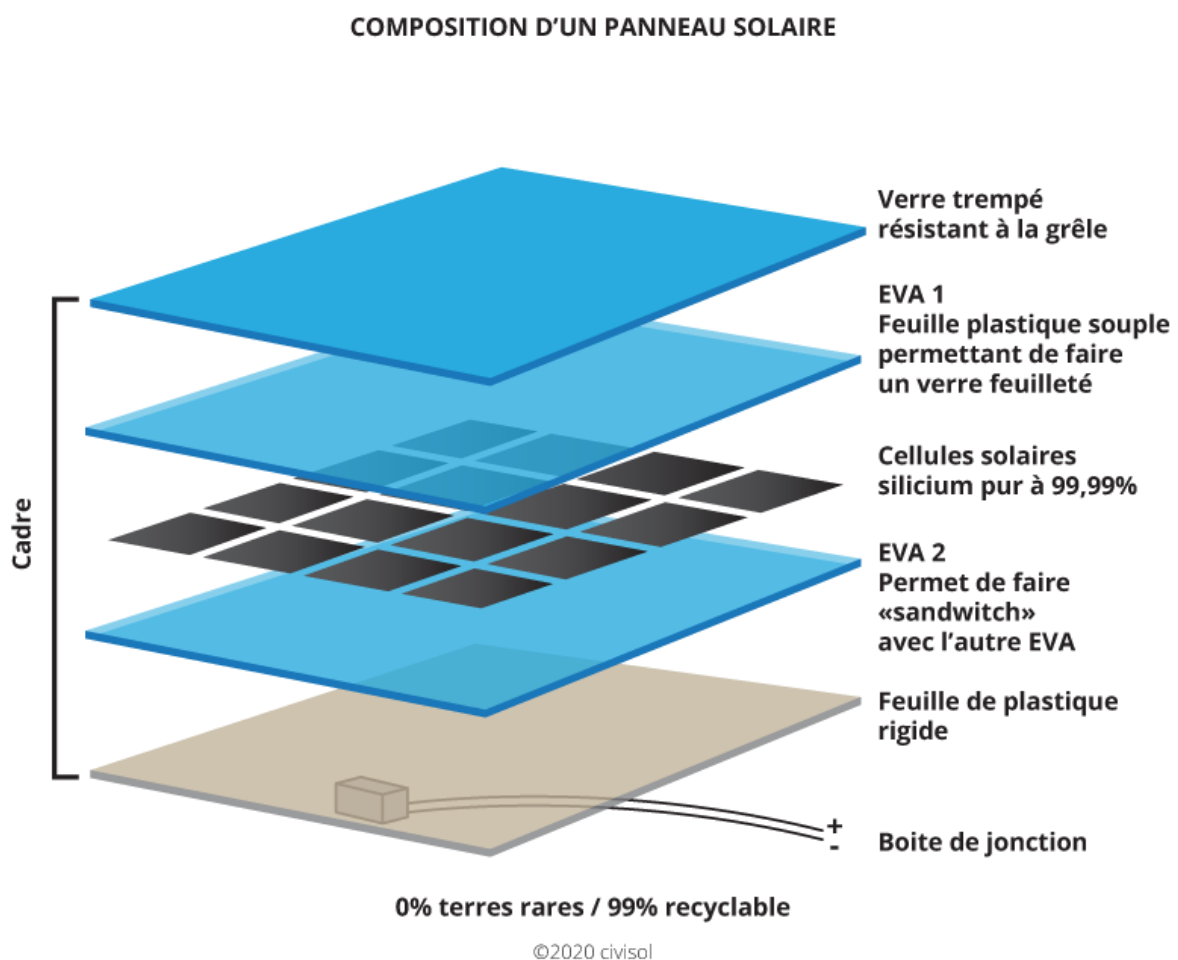


Figure I-14: Un module photovoltaïque. [A29]

I.6.2. Protection des modules photovoltaïques

Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défailante [A27]. Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode by-pass qui se place en dérivation d'un groupe de cellule pour ne pas limiter le courant en situation de déséquilibre. De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes quasiment incapables de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel de 0,6V environ qu'il faut prendre en compte dans le rendement des modules.

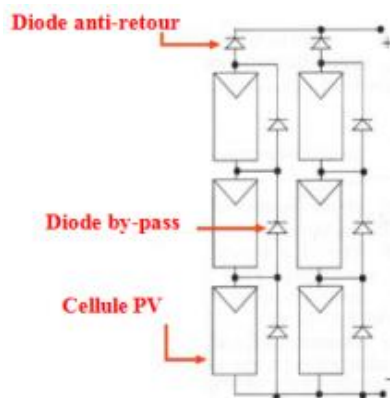


Figure I-15: Protection des modules photovoltaïques. [A27]

I.7. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau [A21]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.7.1. Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I-17) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

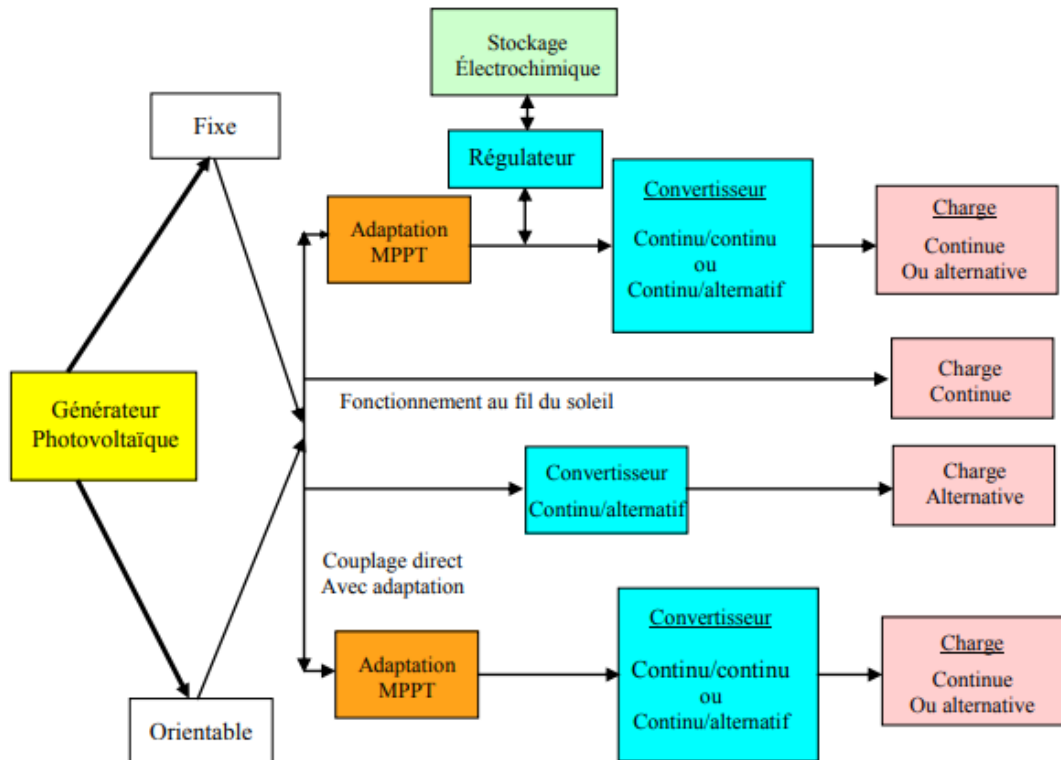


Figure I-16: Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes. [A30]

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir) Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

- **Exemple :** Le pompage au fil du soleil.

I.7.2. Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I-17) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès du quel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

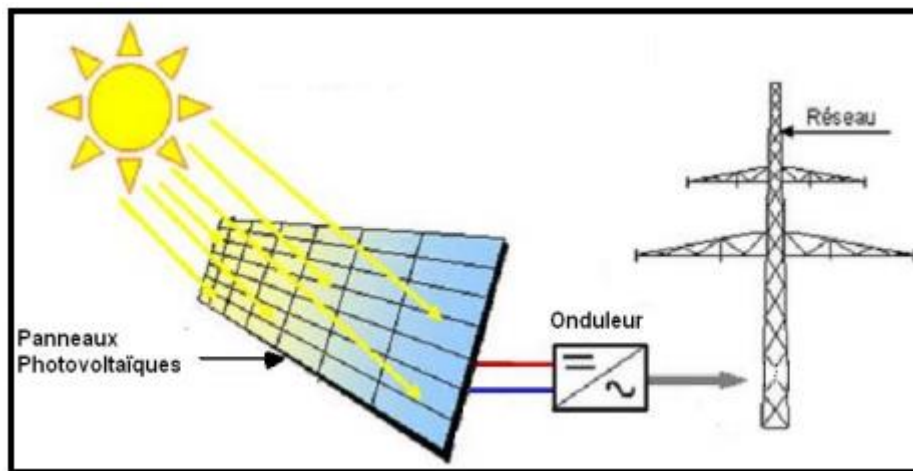


Figure I-17: Systèmes photovoltaïque connectés au réseau. [A31]

I.7.3. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [A32], [A33].

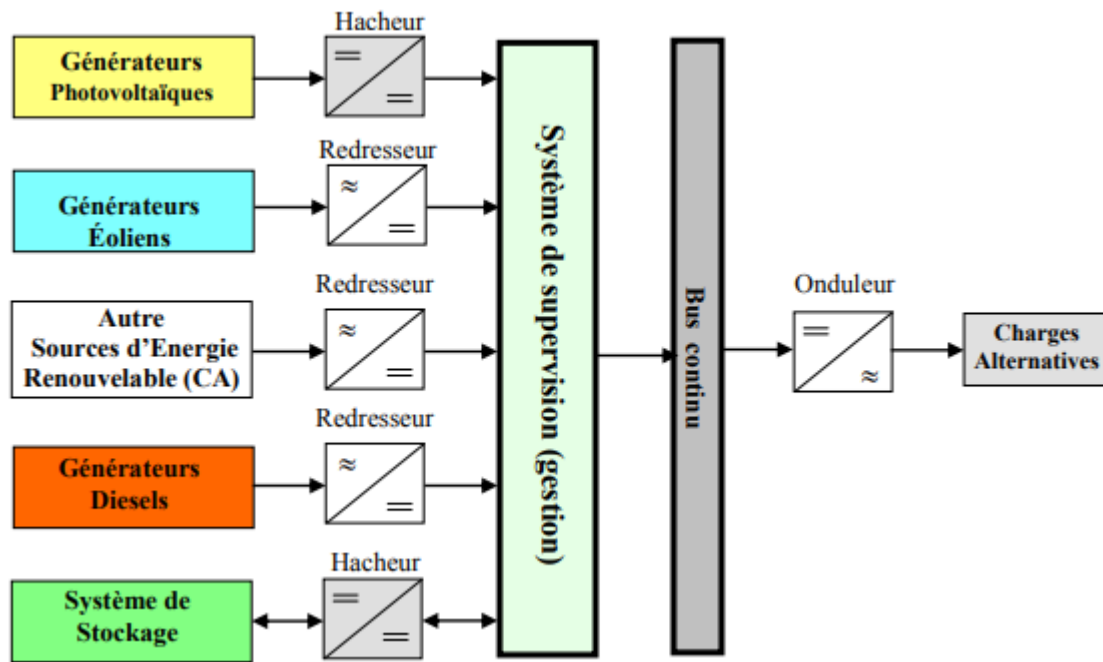


Figure I-18 : Configuration du système hybride à bus continu. [A34]

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu (voir figure I-18). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

I.8. Convertisseurs d'énergie

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

a. Convertisseurs DC/DC (hacheurs) : Le convertisseur DC-DC est un régulateur de conversion de puissance inséré entre le générateur solaire et l'induit du moteur. Le rapport cyclique α ($0 \leq \alpha \leq 1$) donne le ratio de la tension du générateur à la tension aux bornes de la charge. En intercalant entre le générateur et la charge, un

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

convertisseur DC-DC qui consiste en un traqueur de puissance maximale qui va pister le point de fonctionnement maximal du générateur photovoltaïque, Il permet aussi le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. On distingue trois types de convertisseurs: boost, buck et buck-boost, [A35]. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (BUCK). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (BOOST).

b. Convertisseurs DC/AC (onduleur) : Les fonctions de l'onduleur sont de convertir l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité en convertissant le courant continu de l'énergie photovoltaïque issue d'un panneau solaire en courant alternatif.

I.9. Avantages et inconvénients d'une installation PV [A36]

a. Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b. Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule

Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I.10. Conclusion

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base du développement de l'énergie solaire. On a mis en évidence le principe de fonctionnement de cette technologie, présenter ces composants et nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ce système.

Nous nous sommes intéressé et détaillé le système de conversion photovoltaïque autonome car cette méthode permet d'exploiter l'énergie du soleil à divers fins, nous avons aussi essayé de détailler et d'identifier les majors parties constituantes ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production.

Nous allons à présent entamer dans le chapitre suivant, la modélisation des éléments principaux figurants dans une installation photovoltaïque.

Chapitre II

**Modélisation et simulation d'un système
photovoltaïque**

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique $I(V)$ entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP.

Dans ce chapitre nous présentons les principales caractéristique de générateur photovoltaïque et leur différents modelés électriques, en suite nous étudierons l'influence des conditions météorologiques (températures et l'ensoleillement) sur le comportement du générateur PV, ainsi nous procédons à la modalisation du convertisseur DC/DC de type boost.

II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire (courant-tension) du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

II.2.1. Modèle de la cellule solaire [B1]

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du module photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration, nombre de modules en série et en parallèle.

- **Le courant de court-circuit I_{cc}**

Il définit la quantité des paires électron-trou créé et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p) \quad (\text{II.1})$$

I_{cc} : Courant de court circuit de la cellule.

- **La tension en circuit ouvert V_{oc}**

C'est la tension pour la quelle la diode à l'obscurité, fournit un courant nul. Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.2})$$

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

$$V_{th} = \frac{AKT_c}{q} \quad (II.3)$$

I_s : Courant de saturation de la diode

V_{th} : Tension thermique.

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

q : Charge d'un électron $1.6.10^{-19}$.

T_c : Température de la jonction.

k : Constante de Boltzmann $1.38.10^{-23} (J / K)$.

- **Le facteur de forme FF**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (II.4)$$

V_m : Tension de point de puissance maximale (V).

I_m : Courant de point de puissance maximale (A).

- **Point de puissance maximale**

Est le point (V_m , I_m) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_m = V_m \cdot I_m$$

(II.5)

- **La puissance du flux lumineux incident**

$$P_{in} = S \cdot E \quad (II.6)$$

E : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

S : La surface effective des cellules.

- **Température de jonction [B2]**

La température de la jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} E \quad (II.7)$$

Avec :

NOCT : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire

T_a : La température ambiante.

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

- **Le rendement de conversion d'énergie η**

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire Incident

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_m}{P_{in}} \quad (\text{II.8})$$

Où $\eta = \frac{I_m V_m}{S.E}$

II.2.2. Les modèles mathématiques

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

a. Cellule idéale [B3]

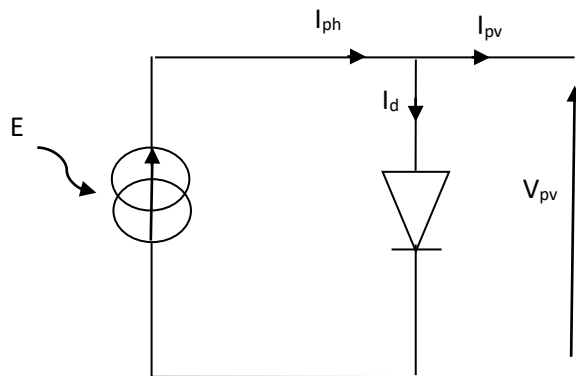


Figure II-1 : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

$$I = I_{ph} + I_d \quad (\text{II.9})$$

$$I_d = I_s e^{\left(\frac{V_{pv}}{AKT_c} - 1\right)} \quad (\text{II.10})$$

I : Courant disponible

I_{ph} : Courant produit par la photopile

V : Tension aux bornes de la cellule

$$\frac{KT}{q} = 26\text{mV à } T_c=300 \text{ °K pour le silicium poly-cristallin.}$$

I_s : Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

b. Modèle à une diode [B4]

Le modèle à une diode est le plus utilisé et il donne de très bonnes précisions. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant

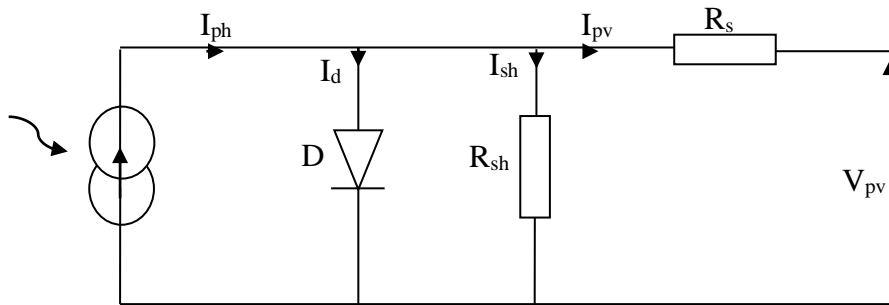


Figure II-2 : schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.11})$$

Tel que :

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] \quad (\text{II.12})$$

Tel que :

E_{ref} : Ensoleillement de référence

T_c : Température absolue de la cellule

T_{cref} : Température de référence

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s e^{\frac{q(V + R_s I_{pv})}{A n_s K T_j}} - 1 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{KT_c}\right)} \quad (\text{II.14})$$

Avec : $E_g = 1.1 \text{ eV}$

E_g : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(v + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (\text{II.15})$$

Tel que :

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'ou l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{KT_c}\right)} e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{AKT_c} - 1\right)} \quad (\text{II.16})$$

c. Modèle à deux diodes [B5]

Ce modèle est représenté par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant modélisent le flux lumineux, les pertes sont modélisé par deux résistances, une résistance shunt R_{sh} , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires.

L'avantage de ce modèle c'est qu'il établi en appliquant seulement des données standard.

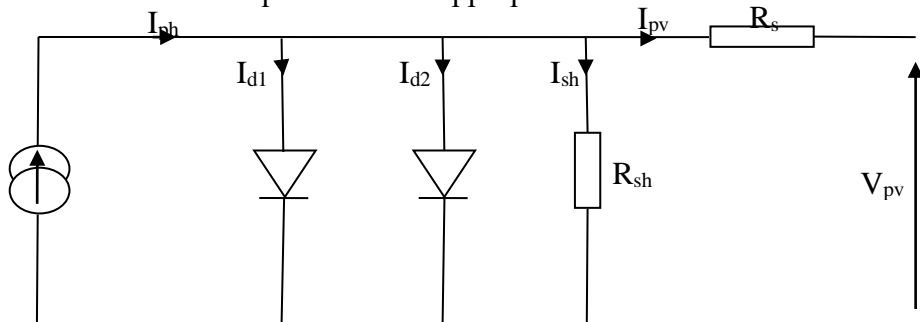


Figure II-3 : schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{KT_c} \right)} e^{\left(\frac{V + R_s I_{pv}}{A n_i K T_c} \right) - 1} - P_5 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{2KT_c} \right)} e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{2 A n_i K T_c} \right) - 1} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II.17})$$

Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de cette caractéristique. Dans notre travail, nous avons retenu le modèle à une diode qui donne de très bonnes précisions [B6], et nous avons utilisé le panneau SIEMENS SM 110-24 de 110 W.

Le tableau (II-1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisé dans les conditions standards ($E = 1000 \text{ W/m}^2, T_c = 25^\circ\text{C}$) :

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	110 W
Puissance nominale P_n	110 W
Courant au point de puissance max I_m	3.15 A
Tension au point de puissance max V_m	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc} (\alpha_{cc})$	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{oc} (\beta_{oc})$	- 152 mV/°C

Tableau II-1 : Paramètres électriques des panneaux SIEMENS [C2].

II.3. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Dans l'environnement Matlab-Simulink, on a réalisé le schéma bloc du générateur photovoltaïque de type SIEMENS SM 110, la figure (II.4) représente le schéma de simulation du module photovoltaïque.

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

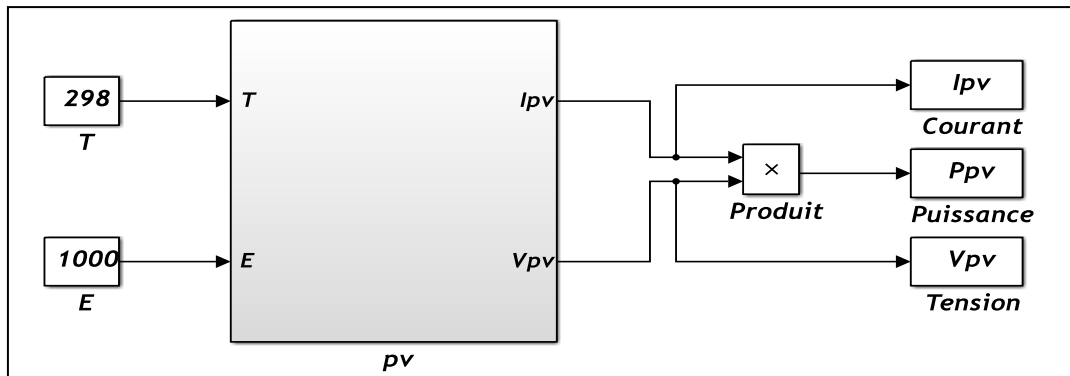


Figure II-4 : Schéma de simulation du panneau photovoltaïque

II.3.1. Influence de l'ensoleillement

Pour voir l'influence de l'ensoleillement, nous avons tracé les caractéristiques P_{pv} - V_{pv} et I_{pv} - V_{pv} , pour différentes valeurs d'ensoleillements mais à une température constante $T_C=25^\circ\text{C}$.

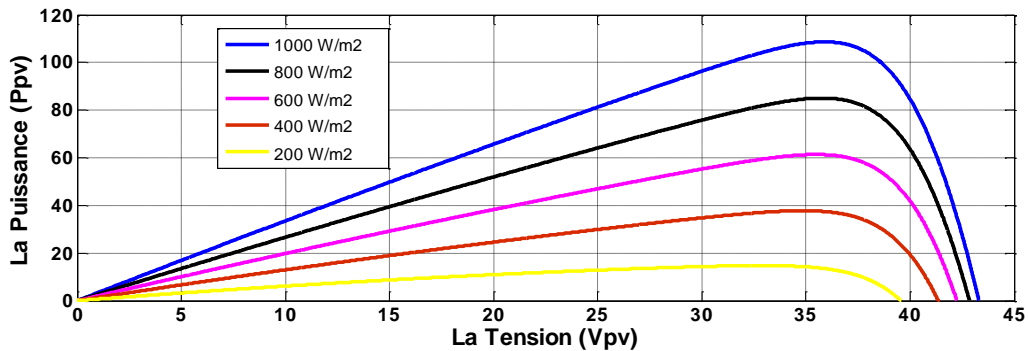


Figure II-5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

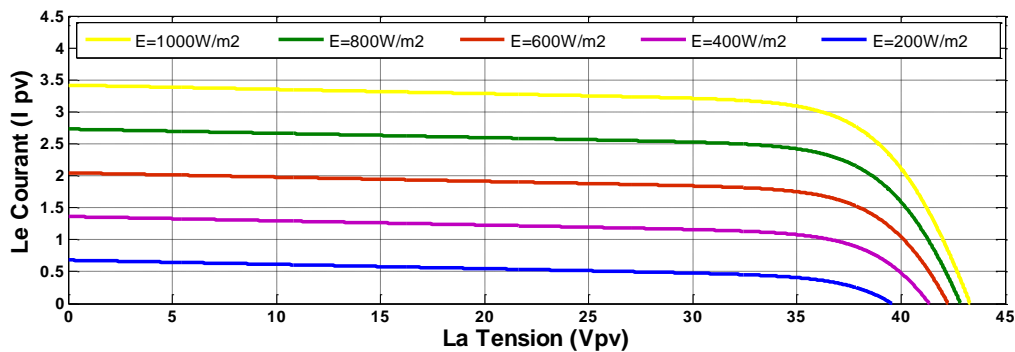


Figure II-6 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

II.3.2. Influence de la température

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques P_{pv} - V_{pv} et I_{pv} - V_{pv} , pour différents niveaux de température, et avec un ensoleillement constant $E=1000W/m^2$.

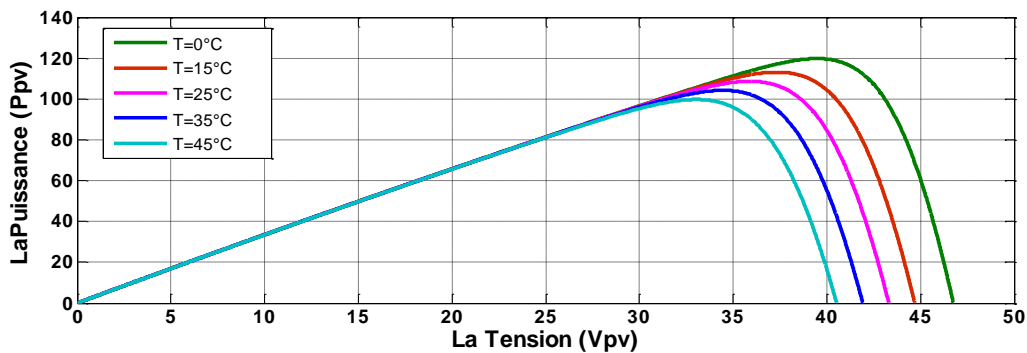


Figure II-7 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

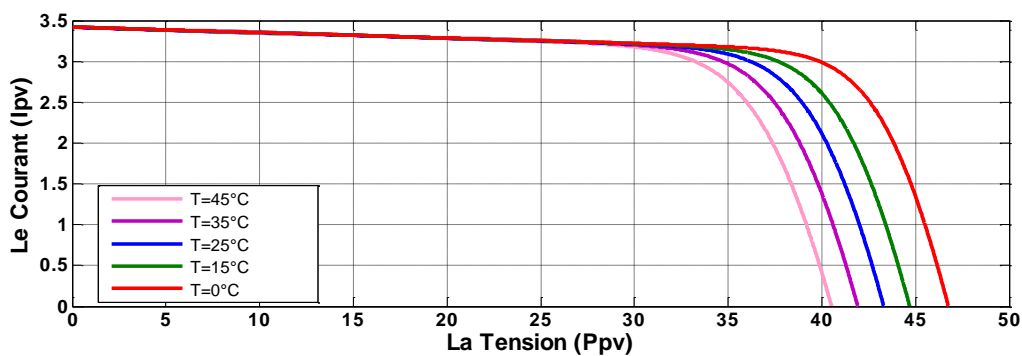


Figure II-8 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

II.3.3. Discussion des résultats

a. Influence de l'ensoleillement

Une température de 25 °C est maintenue constante, l'ensoleillement (E) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (II-5 et II-6).

On remarque :

- ✓ Que le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.
- ✓ Que lorsque l'ensoleillement diminue le point de puissance optimale chute brusquement.
- ✓ Que le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E . Par contre, la tension aux bornes de la jonction varie peu car

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

elle est en fonction de la différence de potentiel de la jonction N-P du matériau lui-même [B7].

b. Influence de la température

Pour un ensoleillement 1000W/m^2 maintenu constant, nous varions la température. Les figures (II-7 et II-8) représentent les résultats de notre simulation obtenue.

On remarque :

- ✓ Que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule
- ✓ Que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert (Plus la température est élevée plus la tension de circuit ouvert V_{co} est faible, et le courant de court-circuit I_{cc} est faiblement dépendant de la température). Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

II.4.1. Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.9) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [26].

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M=V_0 / V_i$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

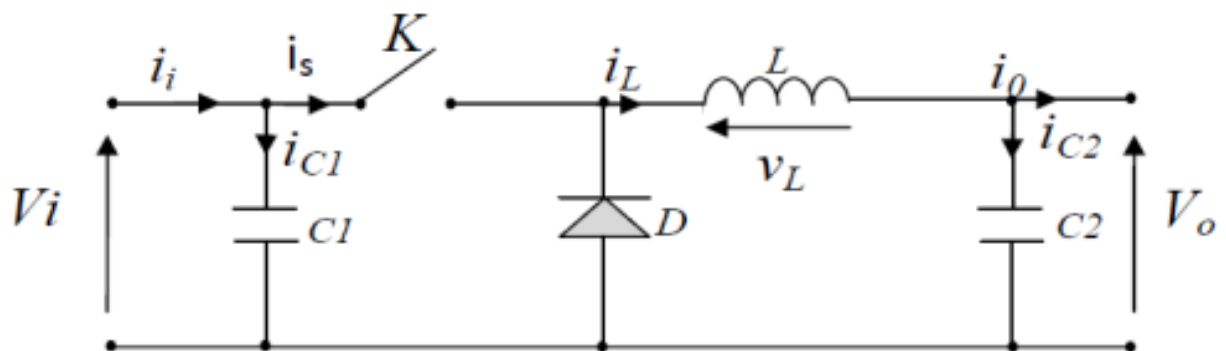


Figure II-9: Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

II.4.2. Hacheur survolteur (boost)

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [B8]. La figure (II-10) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

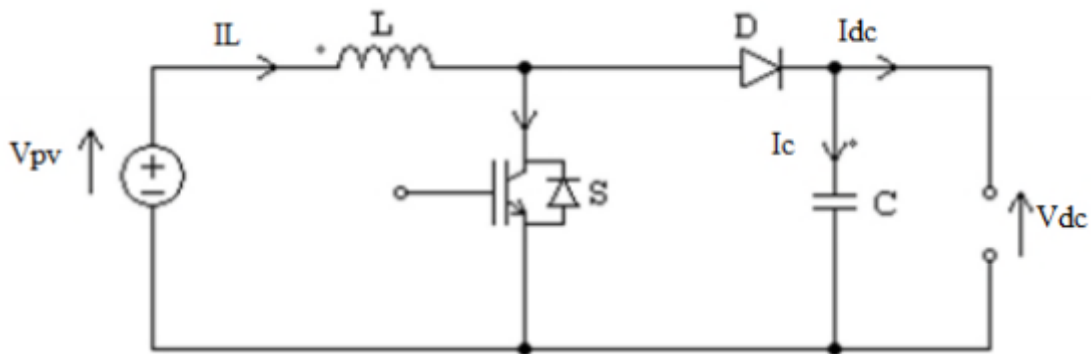


Figure II-10 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost).

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant (T_r est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$ (α rapport cyclique, et compris entre 0 et 1).

la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv}$, le courant traversant l'inductance augmente linéairement.

Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha.T$ à T .

La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv} - V_{dc}$, dans cette phase le condensateur C_s se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [B9].

Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{II.18})$$

$$(1 - \alpha)I_L = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.19})$$

Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.20).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.20})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha) I_1 \quad (\text{II.21})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes constitutions d'un système photovoltaïque ainsi que la modalisation du générateur PV

De plus, nous avons présenté le comportement de notre système et ses performance sous l'influence de différents conditions atmosphérique à savoir l'influence du de l'ensoleillement et la température.

Par ailleurs, en a fait une modalisation du convertisseur DC/DC de types survolteur, et cela pour pouvoir établir la condition de fonctionnement adéquat nécessaire à son couplage avec le générateur photovoltaïque.

Le chapitre suivant est consacré à l'optimisation et la simulation numérique de la chaîne de production d'énergie photovoltaïque.

Chapitre III

**Optimisation et simulation du système
photovoltaïque**

III.1.Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du générateur PV dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la variation du point de puissance maximale.

A cause de cette variation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT; ces techniques sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant en permanence le point de puissance maximale. En effet, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

Dans ce chapitre, nous allons présenter deux méthodes les plus couramment rencontrées qui sont appelées respectivement la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentielle (CI) pour le suivi du point de fonctionnement à la puissance maximale.

III.2. Principe de la recherche du point de puissance maximal

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé. La technique de suivi du point à puissance maximal a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. [C1]

La Figure III.1 représente la chaîne de conversion PV avec le contrôleur MPPT. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I_{PV} et V_{PV} et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

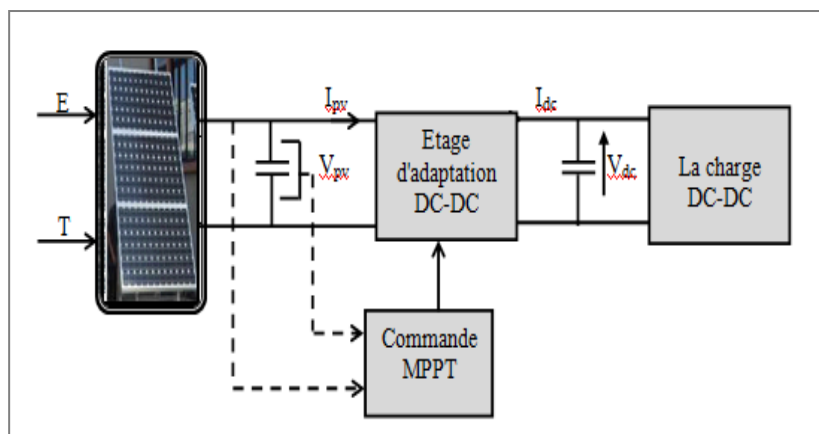


Figure III-1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

III.3. Optimisation par la méthode de perturbation et observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.[C2]

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

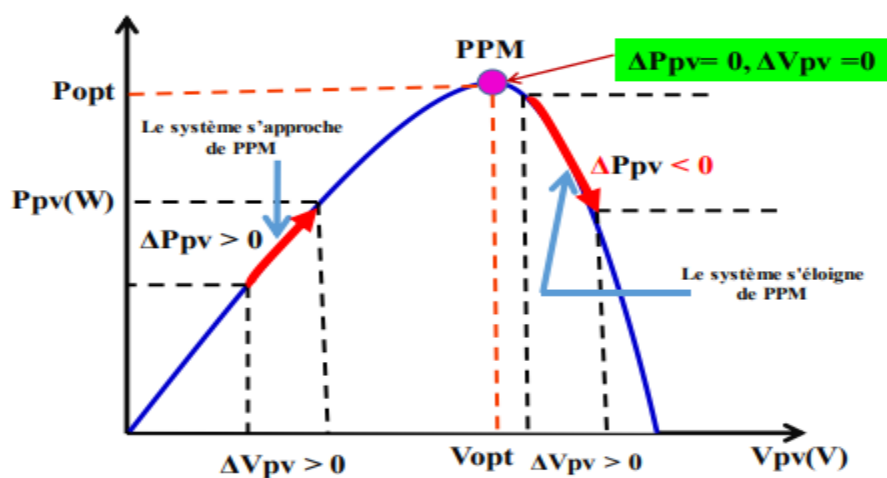


Figure III-2 : Caractéristique (P_{pv}, V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque.

Chapitre III: Optimisation et simulation d'un système photovoltaïque

Le Tableau III.1 résume le principe de fonctionnement de la méthode perturbation et observation.

Perturbation	Changement de la puissance	Perturbation Suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Tableau III-1 : Les modes de perturbation de la méthode P&O.

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure suivante :

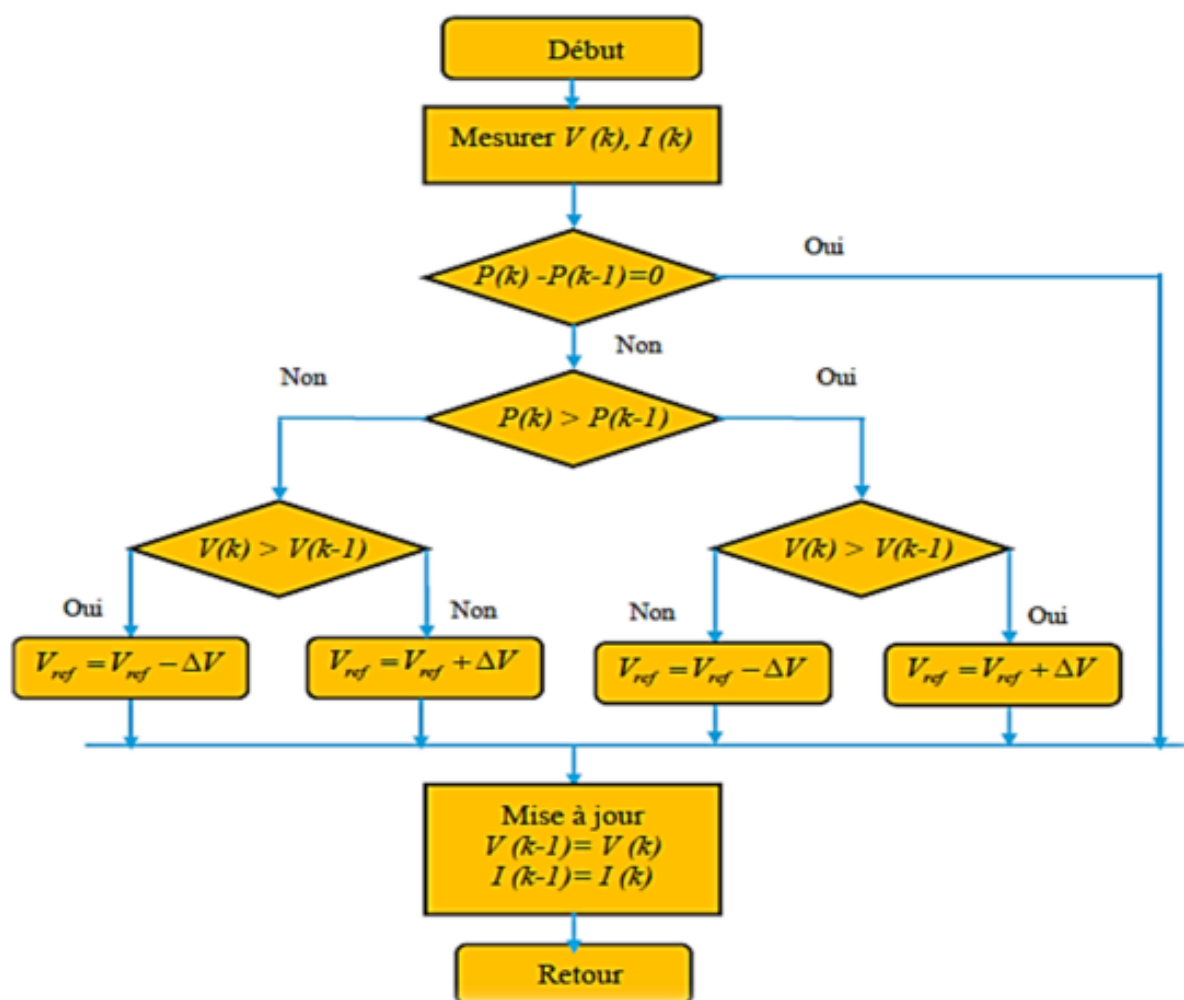


Figure III-3 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.

III.3.1. Applications et simulations de la méthode P&O

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme P&O.

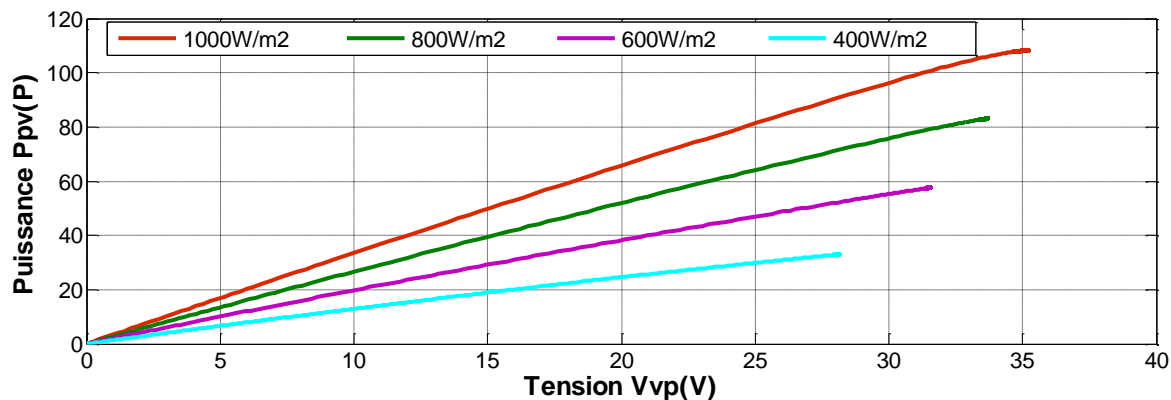


Figure III-4 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec optimisation par la PO

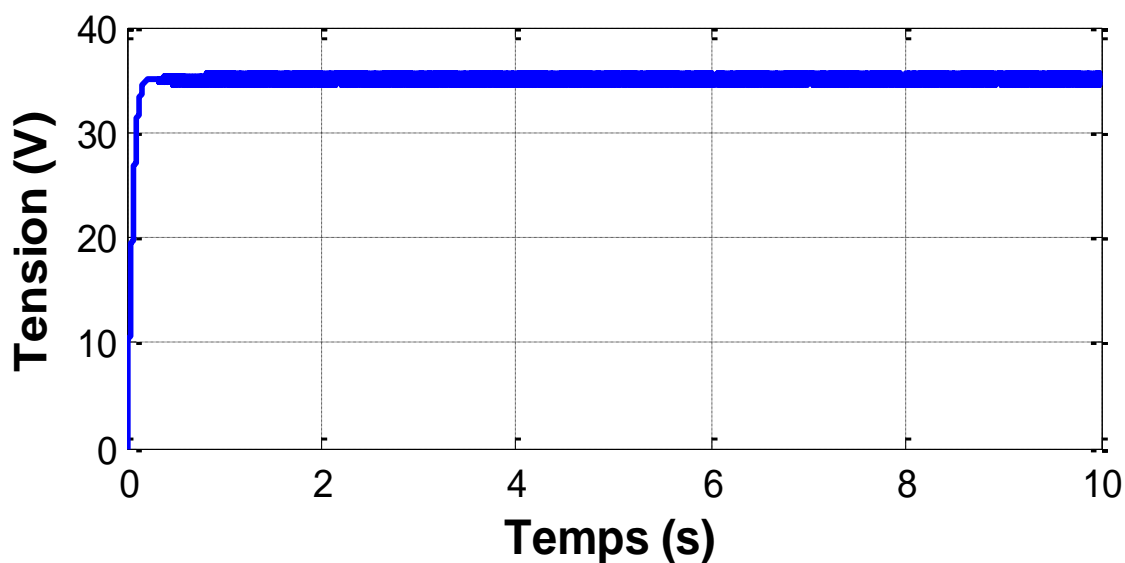


Figure III-5 : Allure de la tension du PV sous les conditions (1000W/m², $T_a=25^{\circ}\text{C}$)

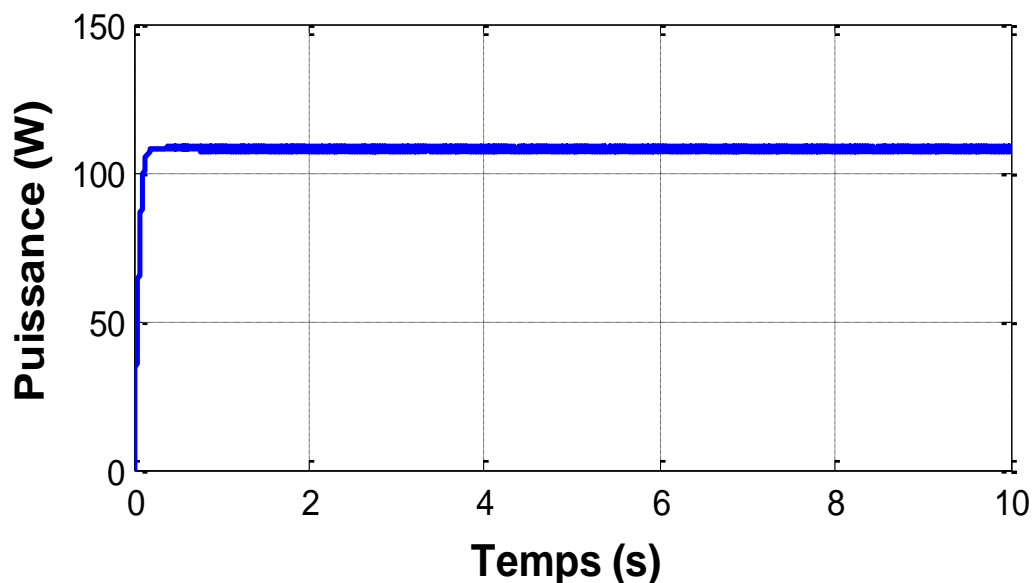


Figure III-6 : Allure de la puissance du PV sous les conditions (1000W/m^2 , $T_a=25^\circ\text{C}$)

III.3.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations ;

- Quand le point de puissance maximale est atteint, la commande MPPT maintient le point de fonctionnement à ce dernier (Figure III.4).
- on remarque que la tension et la puissance convergent vers le point de puissance maximal comme le montre la figure III.5 et la figure III.6
- on constate aussi que les allures obtenues par la méthode de perturbation et d'observation (P&O) présentent des oscillations, qui sont dû à la perturbation continue de la tension de fonctionnement.

III.4. La méthode de conductance incrémentielle (CI)

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous. [C3]

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad \text{III-1}$$

Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad \text{III-2}$$

Chapitre III: Optimisation et simulation d'un système photovoltaïque

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure (III.7) permet d'écrire les conditions suivantes :

$$\text{Si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM} \quad \text{III-4}$$

$$\text{Si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0, \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM} \quad \text{III-5}$$

$$\text{Si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM} \quad \text{III-6}$$

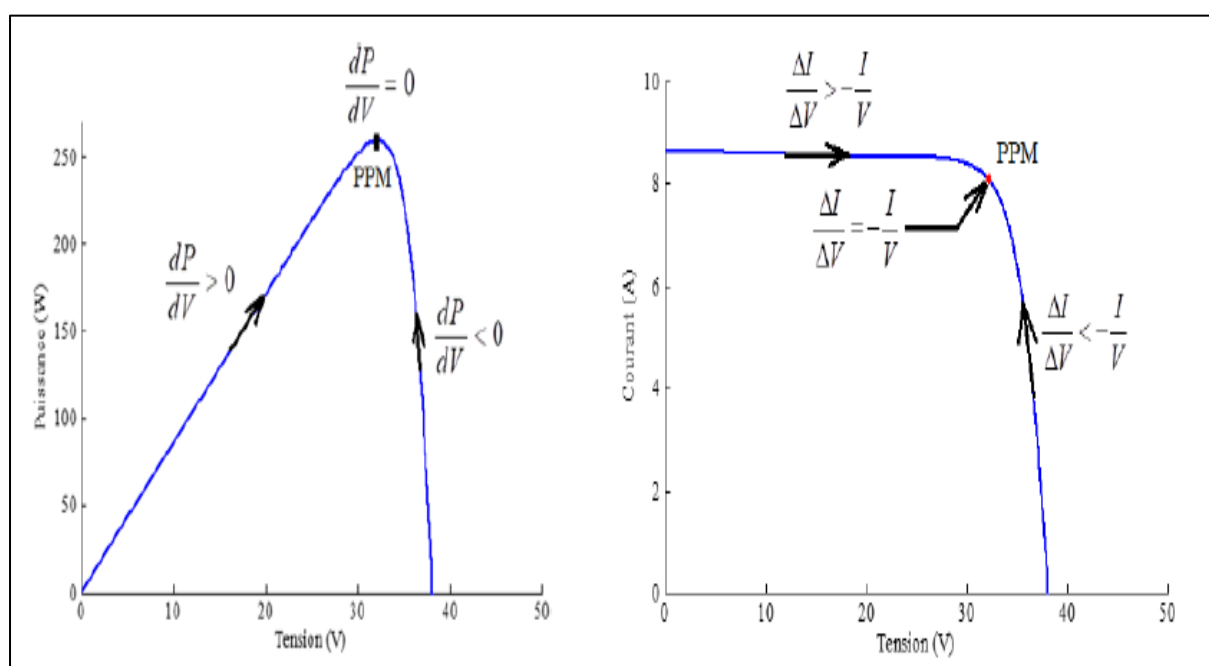


Figure III-7 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P [C3]

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (III-7) et la dérivée de la puissance (dP/dV) peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I + \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad \text{III-7}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

$$\text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} : \text{ Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente}$$

la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique α .

Chapitre III: Optimisation et simulation d'un système photovoltaïque

Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$: Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique α restent constants.

Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$: Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique α .

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance $\left(\frac{I}{V}\right)$ avec celle de l'incrément de conductance $\left(\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}\right)$, comme l'illustre l'algorithme de la figure (III.7). [C3]

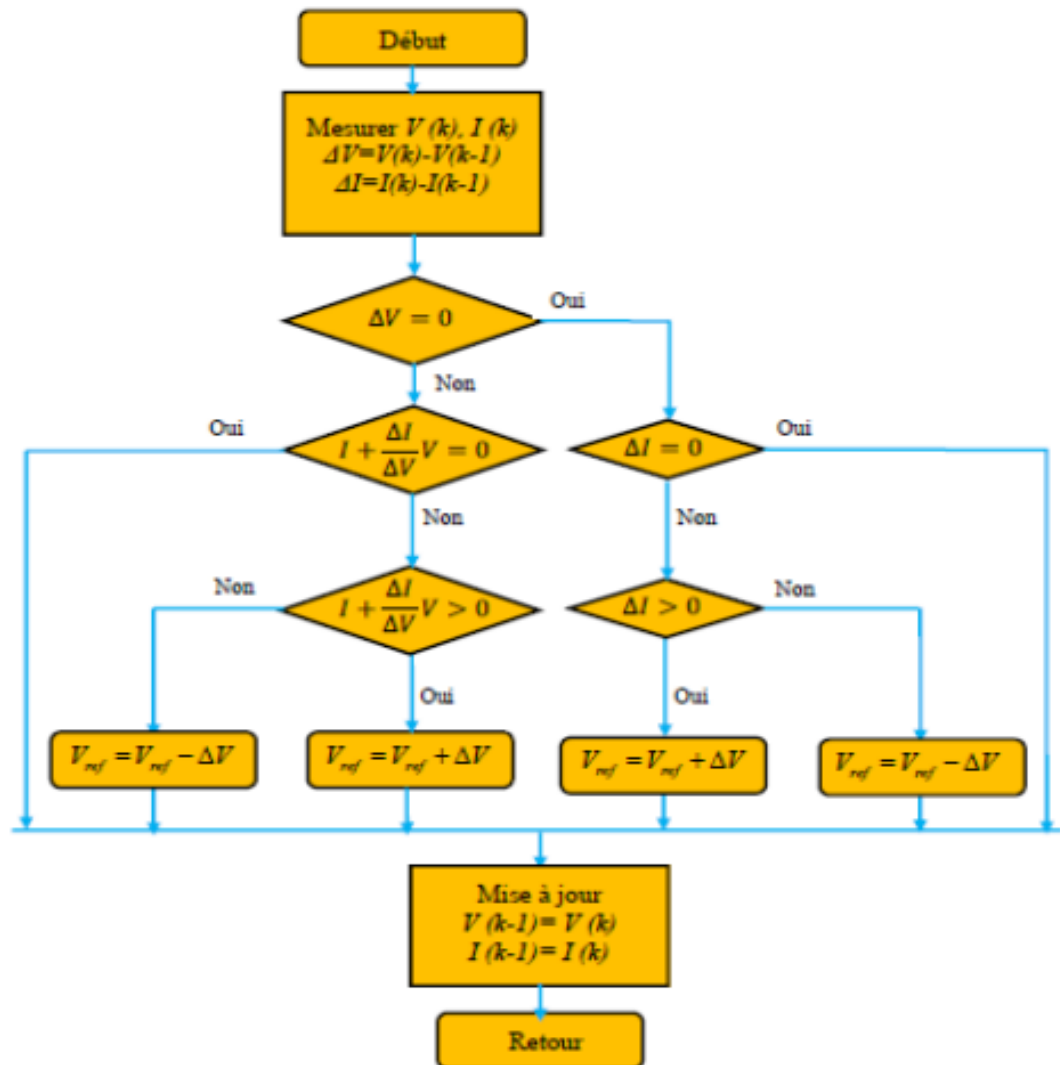


Figure III-8 : Organigramme de l'algorithme (CI) [C4]

Le terme $\left(\frac{I_{pv}}{V_{pv}}\right)$ est la conductance instantanée alors que $\left(\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}\right)$, désigne la variation de cette conductance. Pour éviter que la différentielle de la tension du panneau ΔV ne

Chapitre III: Optimisation et simulation d'un système photovoltaïque

devienne nulle, lorsque le *PPM* est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui va conduire à une division par zéro, l'algorithme fait un test de ΔV .

Si ΔV est nul il teste si le $\Delta I = 0$. Si c'est le cas alors le *PPM* est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de ΔI pour déterminer la position du *PPM* et ajuste le rapport cyclique α . Si $\Delta I > 0$ donc on décrémente le rapport cyclique α , dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

Si ΔV est différent de zéro, il teste si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = - \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$. Si c'est le cas alors le *PPM* est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$ pour déterminer la position du *PPM* et ajuste le rapport cyclique α .

Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > - \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ donc on décrémente le rapport cyclique α , dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

III.4.1. Applications et simulations de la méthode CI

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme CI.

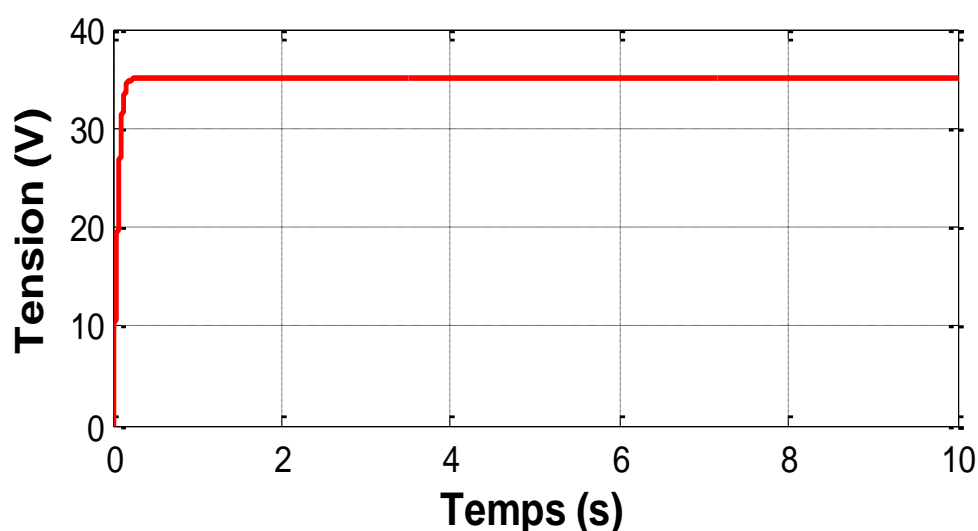


Figure III-9 : Allure de la tension du panneau photovoltaïque après l'application du la CI.

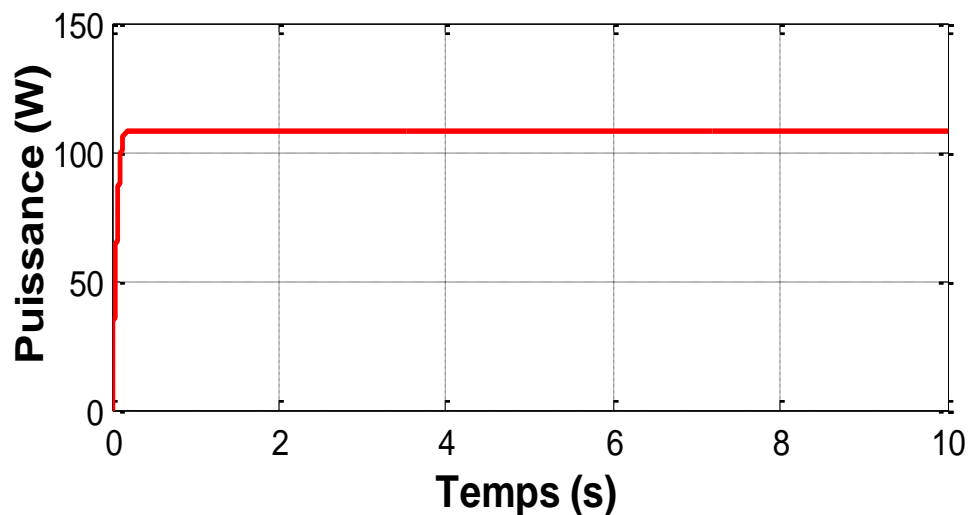


Figure III-10 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque après l'application de la CI.

III.4.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations ; on constate que les fluctuations de puissance en régime permanent des allures obtenues par l'application de la méthode de conductance incrémentielle (CI) sont réduites.

III.5. Comparaison entre les deux méthodes (CI) et (P&O) par un test de robustesses

Sur la figure (III.12), nous présentons l'allure de la puissance photovoltaïque pour différent niveau d'éclairement (figure III.11).

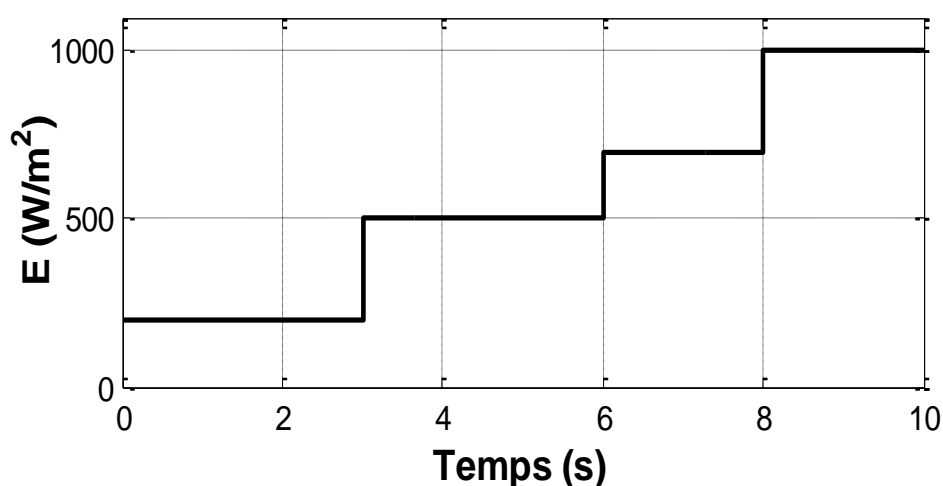


Figure III-11 : profil d'insolation variable ($T_c=25^\circ\text{C}$),

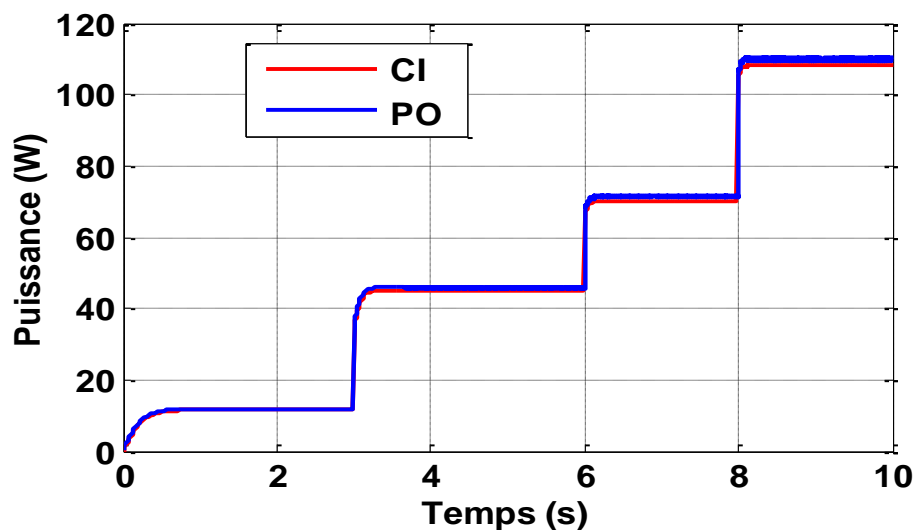


Figure III-12 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O) et (CI).

On fait un zoom sur l'allure de puissance entre deux laps de temps pour mieux visualiser l'allure obtenue par des deux méthodes figure III-13 et figure III-14:

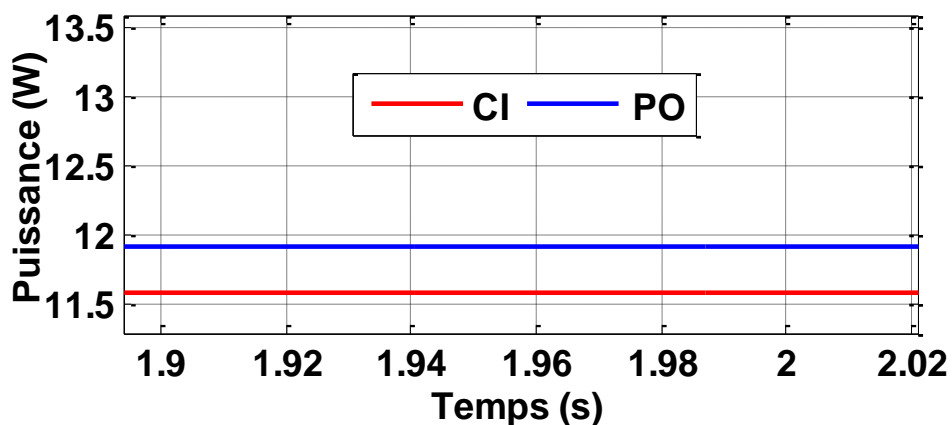


Figure III-13 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque Entre 1.9 seconde et 2.02 seconde.

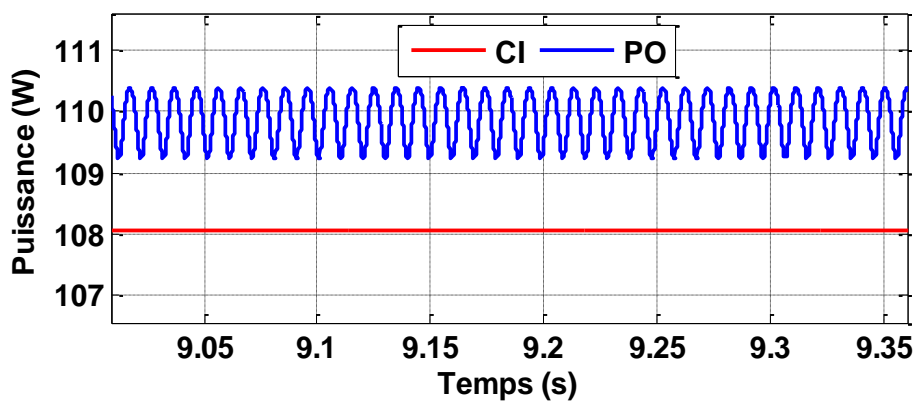


Figure III-14 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque Entre 9.0 s et 9.35 s.

➤ Interprétation des résultats

D'après les résultats de la simulation, on remarque pour un faible éclairement la méthode perturbation et observation (P&O) est meilleure, elle est efficace, stable et plus précise.

Par contre lorsque l'éclairement est fort, la méthode perturbation et observation (P&O) présente des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent, dans ce cas la méthode de la conductance incrémentiel (CI) est plus efficace. Pour cela dans les prochaines simulations on applique la méthode de combinaison entre les deux méthodes (CI-PO).

III.6. Combinaison entre les deux algorithmes (PO-CI)

Un nouveau mode des deux algorithmes, qui combine le contrôle de la tension aux bornes du panneau, pour un ensoleillement de moins de 50% de celui de référence, la méthode perturbations et observations est utilisée, et pour un ensoleillement supérieur à 50%, la méthode de la conductance incrémentielle est utilisée pour la recherche du point de puissance maximale.

L'organigramme de l'algorithme combiné (PO-CI) est montré sur la figure (III.15) :

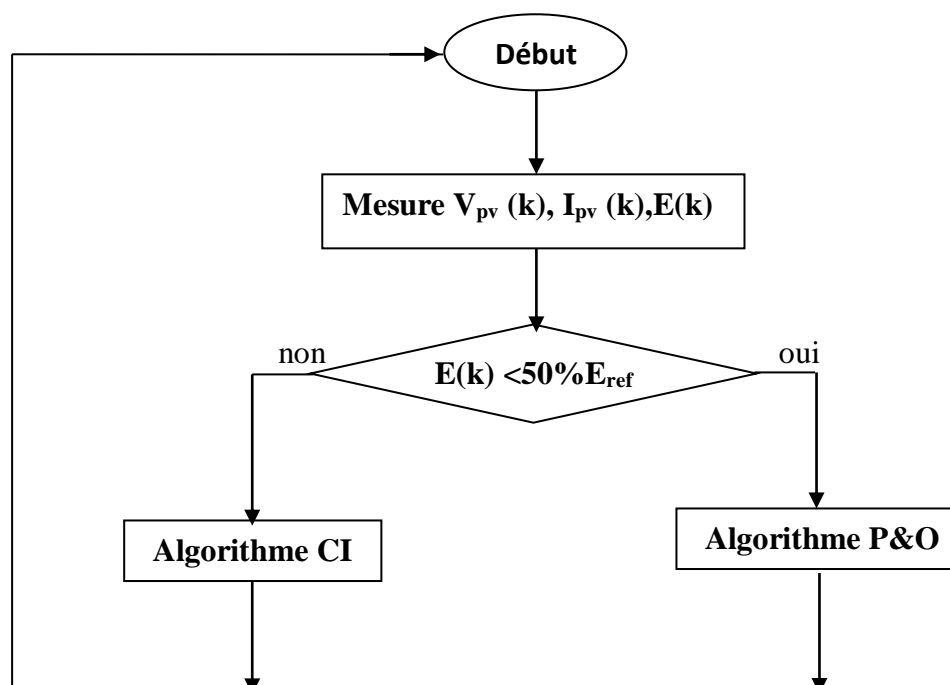


Figure III-15 : Organigramme de l'algorithme combiné (PO-CI)

On applique l'algorithme combiné (PO-CI) pour optimiser le panneau PV et on simule pour le même profil d'ensoleillement précédemment figure (III.11)

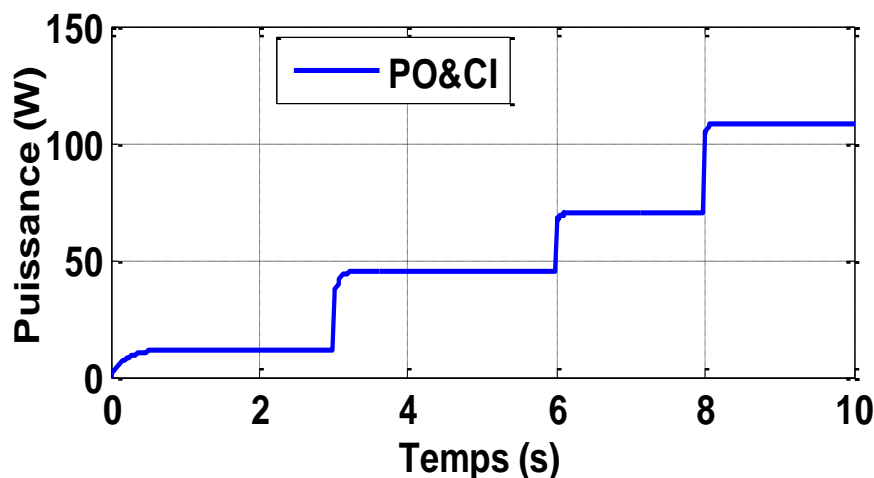


Figure III-16 : Allure de la puissance du panneau PV obtenue par l'application de la (PO-CI)

➤ Interprétation des résultats

On constate, d'après le test de robustesse, que dans le cas d'un changement d'ensoleillement la réponse obtenue par la technique combinée (PO-CI) suit la consigne, stable et plus rapide par rapport à les réponses obtenues par les deux autres méthodes (P&O) et (CI).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a appliqué les différentes méthodes de MPPT, [perturbation et d'observation (PO), conductance incrémentielle (CI), la méthode combinée (CI-PO)] pour accélérer la procédure de recherche le point précis de puissance maximale sous des variations des conditions environnementale.

La méthode combinée (CI-PO) prouve qu'elle a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur au régime permanent très faible, et qu'elle est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Conclusion générale

Conclusion général

Conclusion général

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Pour résoudre ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire qui se trouve dans la plupart des régions du monde, dont le renouvellement naturel est assez rapide et inépuisables à l'échelle du temps humain.

Dans ce travail nous avons fait l'étude de la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation convertisseur DC /DC, une charge DC (résistance) et un étage de commande pour piloter le convertisseur (une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O et CI).

Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier aux systèmes photovoltaïques et nous avons présenté d'une façon générale le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique qui est réalisée à travers de matériaux semi-conducteurs, puis nous avons présenté la cellule solaire et ses différentes technologies.

Après avoir fait la modélisation d'un générateur PV, nous avons vu le comportement du système photovoltaïque (caractéristique puissance-tension et caractéristique courant-tension) par rapport aux variations climatiques. Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique du panneau photovoltaïque est directement liée essentiellement à ses conditions climatiques (l'éclairement et la température).

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge associé à une commande MPPT. Pour se faire, nous avons utilisé des algorithmes MPPT qui sont l'algorithme « perturbation et observation » (P&O) et l'algorithme « Incrémental Conductance » (CI) commandée par un convertisseur élévateur (hacheur boost). Après avoir modélisé et simuler cette technique, nous avons donné les résultats de simulation.

L'étude s'est limitée sur le plan théorique. Cependant on a montré, par simulation, l'intérêt des deux commandes MPPT [perturbation et d'observation (PO), conductance incrémentielle (CI)] pour la recherche du point de puissance maximale sous différents conditions environnementale, Les résultats de simulation nous montrent que la commande CI est précise, rapide et plus robuste. En fin, nous avons démontré qu'en faisant la combinaison

Conclusion général

entre les deux méthodes [PO-CI] nous aurons une meilleure performance, temps de réponse rapide, la robustesse et une erreur très faible au régime permanent.

Il serait aussi intéressant en simulation d'enrichir ce travail par plus de recherches et investigations il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer:

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.

- Amélioration du système global étudié avec un stockage.

Bibliographie

Bibliographie

- [A1] CYRIL Lahore, “ Optimisation de commandes MPPT ”, Mémoire de master, conservatoire national des arts et métiers centre régional de Midi-Pyrénées, Département électronique – automatique, 2012.
- [A2] BENADEL Faiza, “ Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV ”, Mémoire de master, Département de Génie électrique, université mohamed boudiaf - m’sila,2016.
- [A3] Belhadj Mohammed «Modélisation D’un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister2008, Universitaire De Bechar.
- [A4]Hassini née Belghitri Houda «MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION D’UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE »mémoire de magister 2010 UNIV de Tlemcen.
- [A5] B. Chikh –Bled, « Etude du rendement de stockage d’un système photovoltaïque appliqué au pompage hydraulique » thèse de magister Université de Tlemcen 2001.
- [A6] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/>
- [A7] P. Claux, « Atlas solaire français », PYC éditions, 1982.
- [A8] www.intervent.fr/intersolaire/images/rayonnement.pn
- [A9] Bellala Djamel :« Contribution a l’Optimisation des Systèmes de conversion d’Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques Thèse Doctorat en sciences, Université de Batna.
- [A10] M. Boukli-Hacene omar, “ Conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique”, mémoire de master, département de génie électrique, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen ,2011.
- [A11] Ministère de l’énergie et des Mines, " Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique", 2007.
- [A12] MR DJABOUABDELLAH ABDELMADJID , «étude et mesure des donnees solaire dun gisement solaire dans une zone isole » UNIVERSITE D’ADRAR AHMED DRAYA 2015.
- [A13] Le photovoltaïque Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3,4,5,6/10.

Bibliographie

- [A14] Site web, titre d'accueil : anatomie d'une cellule photovoltaïque, web: www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/5/
- [A15] Mme RAHRAH Née AMOKRANE Karima thème « Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », thèse doctorat, université de Béjaia 2016.
- [A16] site web, titre d'accueil: l'énergie solaire application au photovoltaïque, web : www.slideplayer.fr/slide/3250507/
- [A17] LITIM Ahlam et ABID Zouleykha (Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque) Mémoire de Fin d'Etudes, 2017.
- [A18] site web, titre d'accueil : l'énergie solaire photovoltaïque, web : <http://notresolairephotovoltaique.e-monsite.com/pages/1-energie-solaire-une-alternative-aux-energies-non-renouvelables/apparition-et-fonctionnement.html>
- [A19] Site web, titre d'accueil: choix d'un panneau solaire: polycristalin ou monocristallin ?,web : www.solar-kit.com/Panneau-solaire-polycristallin-ou-monocristallin
- [A20] « Semi-conducteur, effet photovoltaïque » C.E.S.I.R.E. Université J. Fourier Grenoble.
- [A21] A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », Le manuel du professionnel, Edition DUNOD, Paris - France, Août 2003.
- [A22] L, Merad. T, Boussoukaia. B, Bouyoucef, « Automatisation d'une installation solaire a base d'un microprocesseur » Article, laboratoire de matériaux et des Energies Renouvelables, Université Abou Baker BELKAID de Tlemcen, 2010.
- [A23] Site web, titre d'accueil : association de cellules, web:www.e-lee.hei.fr/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Association.htm
- [A24] J. F.Reynaud, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.
- [A25] S.Bensmail, «Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïques», Mémoire de Magister de l'Université de Béjaia, Algérie, 2012.

Bibliographie

[A26] S. Ould-Amrouche, « Contribution à l'Étude du Conditionnement de Puissance dans les Systèmes Photovoltaïques », Thèse de Doctorat en Electrotechnique de l'université de Bejaia, Algérie, 2012.

[A27] www.peracod.sn/IMG/pdf/Le_manuel-technicien-photovoltaïque.pdf

[A28] F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.

[A29] site web, titre d'accueil: solaire photovoltaïque : les technologies et leurs trajectoires, web: www.encyclopedie-energie.org/solaire-photovoltaïque-les-technologies-et-leurs-trajectoires/

[A30] Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Dr. BELAID LALOUNI Sofia Maître de Conférences Classe B, Université A.MIRA de BEJAIA 2015.

[A31] site web, titre d'accueil: principe de fonctionnement d'une centrale connectée au réseau, web www.costelec09.free.fr/?p=photovoltaïque&r=reseau

[A32]: Abou El-Maaty Metwally Aly Abd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system, Thèse de doctorat de l'Université de Kassel, Germany, 2005.

[A33]: I. Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.

[A34] Dr. KECHIDA RIDHA Maître de conférences classe B «Polycopié de cours UED 1.1 intitulé, Energies Renouvelables» Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued 2019.

[A35] N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », Division Energie Solaire Photovoltaïque Centre de Développement des Energies Renouvelables, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498

[A36] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001. ARTICLE PDF.

[B1] N.Koide, A Islam, Y.Chiba, L. Han, « Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit », Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 182, Issue 3, 10, pp. 296-30, September 2006.

[B2] I. Vechiu, «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Ph.D. thesis, Université du Havre, 2005.

Bibliographie

- [B3] J. Royer, T.Djiako ,E.Schiller, B. Sada, S.Sous , «Le pompage photovoltaïque :manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens», la direction de Eric Schiller ,Publ. En collab,avec : IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006-7, 1998.
- [B4] W. R.Anis, H. Metwally « Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System », Solar Energy, Vol.53, N°4, pp369-377, 1994.
- [B5] D. Rekioua, O.Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [B6] K.Amokrane , « Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2016.
- [B7] D.Koussa, M.Belhamel , K.Benferhat, « Électrification de sites isolés par un système hybride à sources d'énergies renouvelables », Conférence international sur les énergies renouvelables ICRE'07, pp : 1-6, 2007.
- [B8] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [B9] R.Saisset, «Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph applique aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion », Thèse de Doctorat , Institut Nationale politechnique de toulouse, France, 2004.
- [C1] S.Bensmail, « Optimisation Et Gestion D'un Système Hybride A Energies Renouvelables», Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2017.
- [C2] C. Serir, «optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque», Mémoire de Magister de l'Université de Béjaia, Algérie, 2012.
- [C3] Cabal Cedric « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [C4] H.Abbes, H.Abid, K.Loukil, A.Toumi, M.Abid « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque ». Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Sousse, Tunisie, 2013.